

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS- CAMPUS CASCAVEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

USO DE DIFERENTES INÓCULOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA DE AVIÁRIO

JOSEANE BORTOLINI

CASCAVEL-PARANÁ

2016

JOSEANE BORTOLINI

USO DE DIFERENTES INÓCULOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA DE AVIÁRIO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *Campus* Cascavel.

Orientadora: Prof^a. Dr. Maria Hermínia
Ferreira Tavares

Coorientador: Dr. Osvaldo Kuczman

CASCADEL-PARANÁ

2016

B739u BORTOLINI, Joseane

Uso de diferentes inóculos na digestão anaeróbica da cama de aviário / Joseane Bortolini. – 2016.
104 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2016.

Orientação: Prof^a. Dr. Maria Hermínia Ferreira Tavares.

1. Avicultura. 2. Biogás. 3. Inóculo Bovino. 4. Inóculo Suíno
I. Título.

DD 628.354

Bibliotecária: Elisandra Artus Berté CRB- 9/1675

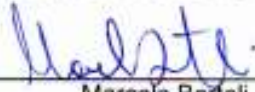
JOSEANE BORTOLINI

**USO DE DIFERENTES INÓCULOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA DE
AVIÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de pós-graduação stricto sensu em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos hídricos e saneamento ambiental, linha de pesquisa Saneamento ambiental, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientador(a) - Maria Herminia Ferreira Tavares

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Marcelo Bortoli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná


Luciana Pagliosa Carvalho Guedes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 12 de fevereiro de 2016

BIOGRAFIA RESUMIDA

Joseane Bortolini, filha de Luiz Carlos Bortolini e Adélia Gonzatti, nascida em 10 de fevereiro de 1991, é natural da cidade de Xanxerê, Estado de Santa Catarina. Em 2009, iniciou o curso de Graduação em Engenharia Ambiental – Bacharelado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – *Campus* de Francisco Beltrão, com graduação em março de 2014. Em março do mesmo ano, iniciou o Curso de Pós-Graduação Stricto Sensu Nível Mestrado em Engenharia Agrícola – Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da UNIOESTE – *Campus* Cascavel.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados”.

(Mahatma Gandhi)

DEDICATÓRIA

Com muito carinho, dedico este trabalho a toda minha família, pela compreensão, apoio e incentivo para conclusão do Mestrado.

AGRADECIMENTOS

Há tantos a agradecer, sem dúvidas os parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte desta importante fase da minha vida. Portanto, peço desculpas aos que não estão presentes nessas palavras, mas estejam certos de que, em meus pensamentos, fazem parte da minha gratidão;

Primeiro, agradeço à Professora Dra. Maria Hermínia Ferreira Tavares, por sua dedicação e orientação deste trabalho e ao Dr. Osvaldo Kuczman, pela coorientação e, por meio deles, reporto-me a toda a comunidade da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PEGEAGRI), pelo apoio incondicional;

Sou grata à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fornecimento da bolsa de pesquisa;

Agradeço também aos pesquisadores e professores da banca examinadora e a todos os demais pela contribuição e atenção dedicadas ao estudo, principalmente aos técnicos: Edison B. Cunha e Euro K. Kailer, por toda ajuda dispensada;

Aos meus amigos, especialmente: Adriana N. L. Model, André C. Amaral, Dayane Freitag, Denise Palma, Ederson Bugatti, Fábio Pacheco, Mariana Sbizarro, Simone Morgan Dellagostin, e aos demais colegas de trabalho que me ajudaram das mais diversas formas.

Deixo ainda registrado o meu reconhecimento à minha família, em especial ao meu marido Tailon Dal Maso Lucas, que me acompanharam e me incentivaram nesses dois anos de dedicação e compreenderam meus momentos de ausência.

Muito obrigada a todos!

USO DE DIFERENTES INÓCULOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DA CAMA DE AVIÁRIO

RESUMO

O crescente aumento populacional contribui para o relevante aumento de consumo e consequentemente de produção de frangos, o qual acarreta maior geração de resíduos, pois a cama de aviário recebe as excretas. Uma das alternativas para o tratamento do resíduo e destinação final abordada neste trabalho é a digestão anaeróbia da cama de aviário (CA), que além de gerar o biofertilizante, produz o biogás. No entanto, tanto a partida do biodigestor como a qualidade e quantidade do biogás gerado estão relacionadas com o material a ser digerido e com as condições de operação do mesmo, os quais são fatores para a utilização de inóculo. Assim, o presente estudo teve como objetivo geral investigar a influência de aplicação de digestato como inóculos na biodigestão anaeróbia da cama de aviário. Para isso, inicialmente, foram realizados testes de potencial biometanogênico específico da cama de aviário e teste para verificar se o uso de digestato como inóculo influenciava a produção de biogás. Por fim, realizou-se o experimento e os inóculos foram testados (digestatos bovino e suíno) no processo de biodigestão anaeróbia da cama de aviário, com alimentação diária, conforme as cargas volumétricas testadas - 0,67; 1,00; e 1,67 gSV.L⁻¹dia⁻¹. Foi possível concluir que a cama de aviário pode ser utilizada como substrato no processo de biodigestão anaeróbia, assim como a utilização de digestato como inóculo apresentou resultados satisfatórios em relação à produção de biogás, uma vez que o tratamento sem adição de inóculo apresentou a menor média de produção de biogás. Em relação à comparação entre os inóculos, (digestato bovino e suíno), foi possível concluir que ambos são indicados no processo de biodigestão com cama de aviário. Contudo, o inóculo bovino apresentou os maiores valores em relação à produção de biogás e metano, e os menores valores em relação às porcentagens de fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina (LIG), evidenciando as vantagens de sua utilização como inóculo em função de sua maior capacidade na degradação das frações fibrosas.

Palavras-chave: avicultura, biodegradabilidade, biogás, inóculo bovino, inóculo suíno.

USE OF DIFFERENT INOCULA AT POULTRY LITTER ANAEROBIC DIGESTION

ABSTRACT

The increasing population development has contributed to a significant increase in consumption and consequently poultry production, which results in a larger waste generation, since poultry litter receives excreta. One of the alternatives to treat waste and find a final disposal to it in this trial is the anaerobic digestion of poultry litter (PL), which not only generates bio-fertilizer, but also produces biogas. However, digester starting as well as quality and quantity of generated biogas are associated to the material to be digested and with the same operating conditions, since they are factors for inocula application. Thus, this study aimed to investigate the influence of digestate application as inoculum at anaerobic digestion from poultry litter. Firstly, specific biomethanogenic potential tests were carried out from poultry litter and there was a test to check if the digestate use as inocula has influenced on biogas production. Finally, this trial was carried out and inocula were tested (beef and swine digestate) during anaerobic digestion process of poultry litter, with daily diet, according to the volumetric loads that were tested - 0.67; 1.00; and 1.67 gSV.L⁻¹day⁻¹. It was concluded that poultry litter can be used as substrate in anaerobic digestion process and that digestate application as inoculum has shown adequate results regarding biogas production, since the treatment without inoculum addition showed the lowest biogas answers. So, when the inocula were compared with one another (beef and swine digestate), it was concluded that both of them are indicated in the digestion process with poultry litter. However, bovine inoculum showed the highest values of biogas and methane production, and also the lowest values in relation to the percentages of neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF) and lignin (LIG), highlighting the advantages of its use as inoculum due to its greater capacity to degrade fibrous fractions.

Keywords: biodegradability, biogas, bovine inoculum, poultry, swine inoculum.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Objetivos específicos.....	2
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1 Produção de frango	3
3.2 Cama de aviário (CA)	4
3.3 Biodigestão anaeróbia.....	6
3.4 Inóculo.....	10
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1 Local do experimento	13
4.2 Cama de aviário (CA)	13
4.3 Inóculo.....	14
4.4 Fase Experimental I.....	15
4.5 Fase Experimental II.....	18
4.9 Metodologia.....	21
4.10 Análise Estatística.....	24
5 RESULTADOS.....	26
5.1 Fase Experimental I.....	26
5.1.1 Potencial biometanogênico específico.....	26
5.1.2 Teste com diferentes porcentagens de inóculo suíno	27
5.2 Fase Experimental II.....	31
5.2.1 pH e Temperatura.....	31

5.2.2. N-amoniaco.....	33
5.2.2. Alcalinidade e Acidez Volátil	34
5.2.3 Relação AV/AT e Relação AI/AP	35
5.2.4 Serie de sólidos (ST, STF e STV)	39
5.2.5 Remoção de sólidos (ST, STF e STV).....	41
5.2.6 DQO _{Total} e DQO _{Solúvel}	47
5.2.7 Remoção DQO _{Total} e DQO _{Solúvel}	49
5.2.8 Produção de Biogás	52
5.2.9 Produção Específica de Biogás em relação aos SV.....	55
5.2.10 Produção Específica de Biogás em relação a DQO.....	57
5.2.11 Produção de Metano	60
5.2.13 Digestatos	64
5.2.14 Lodo	67
6 CONCLUSÃO	69
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
8 REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICES.....	78
APÊNDICE A	78
APÊNDICE B	79
APÊNDICE C	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Caracterização físico-químicas e de nutrientes da cama de aviário (CA).....	13
Tabela 2 Caracterização físico-químicas e de nutrientes do inóculo bovino e suíno	15
Tabela 3 Condições de inoculação empregadas no experimento	17
Tabela 4 Quantidades de cada componente utilizado na mistura de abastecimento	17
Tabela 5 Parâmetros considerados nos biodigestores	19
Tabela 6 Parâmetros, metodologias e periodicidade de monitoramento	21
Tabela 7 Análise de Variância com 5% de significância, para produção de biogás	28
Tabela 8 Teste Tukey para médias de produção de biogás ao nível de 5% de significância	29
Tabela 9 Análise descritiva para pH e temperatura	31
Tabela 10 Análise descritiva para N-amoniaco	33
Tabela 11 Análise descritiva para alcalinidade e acidez volátil	34
Tabela 12 Análise descritiva para relação AV/AT e relação AI/AP	36
Tabela 13 Análise de variância para relação AV/AT	38
Tabela 14 Desdobramento de médias para a relação AV/AT em função dos inóculos e das cargas	38
Tabela 15 Análise descritiva para ST, STF e STV	39
Tabela 16 Análise descritiva para remoção de sólidos ST, STF e STV	41
Tabela 17 Análise de variância para remoção de ST	44
Tabela 18 Teste Tukey para as médias de remoção de ST ao nível de 5% de significância	45
Tabela 19 Análise de variância para remoção de STF	45
Tabela 20 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável remoção de STF	45
Tabela 21 Análise de variância para remoção de STV	46
Tabela 22 Teste Tukey para as médias de remoção de STV ao nível de 5% de significância	46
Tabela 23 Análise descritiva para DQO _{Total} e DQO _{Solúvel}	47
Tabela 24 Análise descritiva para remoção de DQO _{Total} e DQO _{Solúvel}	49
Tabela 25 Análise de variância para remoção de DQO _{Solúvel}	51
Tabela 26 Teste Tukey para as médias de remoção de DQO _{Solúvel} ao nível de 5% de significância	51
Tabela 27 Análise descritiva para produção de biogás em L _{biogás} ·dia ⁻¹	52
Tabela 28 Análise de variância para produção de biogás	53
Tabela 29 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção de biogás	53

Tabela 30 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção de biogás	54
Tabela 31 Análise descritiva para produção específica de biogás por SV, expressa em $L_{\text{biogás}} \cdot g \text{ SV}^{-1}$	55
Tabela 32 Análise de variância para produção específica de biogás por SV	56
Tabela 33 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção específica de biogás por SV	56
Tabela 34 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção específica de biogás por SV	57
Tabela 35 Análise descritiva para produção específica de biogás por DQO	58
Tabela 36 Análise de variância para produção específica de biogás por DQO	59
Tabela 37 Teste Tukey para as médias produção específica de biogás por DQO ao nível de 5% de significância.....	59
Tabela 38 Análise descritiva para produção de metano	60
Tabela 39 Análise de variância para produção de metano.....	61
Tabela 40 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção de metano.....	61
Tabela 41 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção de metano.....	62
Tabela 42 Médias de biogás e metano utilizadas para comparação da (%) percentagem de metano no biogás	63
Tabela 43 Análise descritiva para micronutrientes	64
Tabela 44 Análise descritiva para macronutrientes	65
Tabela 45 Caracterização nutrientes do lodo bovino (LB) e suíno (LS).....	67
Tabela 46 Composição da fração fibra da cama de aviário, lodo bovino e lodo suíno.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolução do abate de frangos por trimestre Brasil de 2008 a 2014	03
Figura 2 Etapas da Digestão Anaeróbia	08
Figura 3 Cama de aviário utilizada no experimento	14
Figura 4 Biodigestor PVC de 60L	16
Figura 5 Gasômetro PVC	16
Figura 6 Biodigestor PVC de 4L	18
Figura 7 Frasco de Mariotte	20
Figura 8 Estrutura Experimental.....	20
Figura 9 Gráfico de volume líquido específico de biogás da amostra de cama de aviário e do controle de celulose microcristalina	26
Figura 10 Relação entre as diferentes porcentagens de digestato (inóculo) testadas com as produções de biogás obtidas	28
Figura 11 Produção de biogás	30
Figura 12 Monitoramento do pH.....	30
Figura 13 Monitoramento do pH, para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	32
Figura 14 N-amoniaco para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	34
Figura 15 Monitoramento da alcalinidade e acidez volátil para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	35
Figura 16 Relação AV/AT para inóculo bovino (B) e suíno (S)	36
Figura 17 Relação AI/AP para inóculo bovino (B) e suíno (S)	36
Figura 18 ST para inóculo bovino (B) e suíno (S)	40
Figura 19 STV para inóculo bovino (B) e suíno (S)	40
Figura 20 STF para inóculo bovino (B) e suíno (S)	41
Figura 21 Porcentagem (%) da Remoção de ST para inóculo bovino (B) e suíno (S)	42
Figura 22 Porcentagem (%) da Remoção de STV para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	43
Figura 23 Porcentagem (%) da Remoção de STF para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	43
Figura 24 DQO _{Total} para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	48
Figura 25 DQO _{Solúvel} para inóculo bovino (B) e suíno (S)	48
Figura 26 Porcentagem (%) de Remoção DQO _{Total} para inóculo bovino (B) e suíno (S)	50
Figura 27 Porcentagem (%) de Remoção DQO _{Solúvel} para inóculo bovino (B) e suíno (S)..	50
Figura 28 Produção de biogás para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	53
Figura 29 Produção específica de biogás por SV para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	56
Figura 30 Produção específica de biogás por DQO para inóculo bovino (B) e suíno (S).....	58
Figura 31 Produção de metano para inóculo bovino (B) e suíno (S)	61
Figura 32 Médias utilizadas para comparação da porcentagem (%) de metano no biogás.	63

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

DQO	Demanda Química de Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
CA	Cama de Aviário
AV	Alcalinidade Volátil
AT	Alcalinidade Total
AV/AT	Relação entre Acidez Volátil e Alcalinidade Total
AI/AP	Relação entre Alcalinidade Inicial e Alcalinidade Parcial
ST	Sólidos Totais
STV	Sólidos Totais Voláteis
STF	Sólidos Totais Fixos
rpm	Rotações por minuto
TRH	Tempo de retenção hidráulica
BMP	Potencial biometanogênico específico
IN	Inóculo
S	Inóculo Suíno
B	Inóculo Bovino
LS	Lodo Suíno
LB	Lodo Bovino

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional contribui para um relevante aumento de consumo, principalmente alimentício e, neste contexto, a produção de frangos ganha espaço. Por outro lado, com o aumento da produção de frangos, é necessária a utilização de recursos e, consequentemente, são gerados diversos resíduos.

O principal resíduo é a cama de aviário, responsável por receber as excretas (fezes e urina), por isso é um resíduo que necessita de tratamento. Por muito tempo esse resíduo foi utilizado para a alimentação de animais, mas, no ano de 2004, esse tipo de destinação foi proibido, em função da transmissão da doença popularmente conhecida como “vaca-louca”. Tal fato contribuiu para a busca por alternativas que permitam a destinação adequada da cama de aviário, a fim de minimizar os impactos ambientais.

Dentre as alternativas para tratamento do resíduo e destinação final, podemos citar a compostagem e sua posterior utilização como fertilizante orgânico ou como substrato para produção de mudas, assim como o processo de biodigestão anaeróbia.

No caso da biodigestão anaeróbia, além do tratamento do resíduo, pode-se aplicar o digestato gerado no solo para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas. Além de produzir o biogás que pode ser utilizado como fonte de energia para o próprio processo de produção.

A biodigestão anaeróbia é um processo que ocorre sem a presença de oxigênio, cujas bactérias anaeróbias degradam a matéria orgânica via fermentação, nas fases de hidrólise, acidogênica, acetogênica e metanogênica, quando há a produção de metano e dióxido de carbono. Geralmente, a maior porcentagem do biogás produzido é composta por metano, com pequenas quantidades de outros gases. No entanto, a partida do biodigestor, a qualidade e a quantidade do biogás estão relacionadas com o material a ser digerido e com as condições de operação do mesmo. Portanto, alguns fatores como pH, temperatura, vazão de alimentação diária, utilização de inóculo, dentre outros, influenciam no processo.

Os estudos referentes à utilização de inóculo são crescentes e vários autores relatam sua importância. Também são apresentados resultados satisfatórios com a utilização da mesma, principalmente, em função da quantidade de microrganismos presentes no material. Contudo, são poucos os estudos referentes à compatibilidade do inóculo com o substrato a ser digerido.

Assim, o presente estudo foi desenvolvido nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola, referente à linha de Pesquisa de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da UNIOESTE Campus Cascavel-PR, com o objetivo de investigar a influência da utilização de digestatos como inóculos no processo de biodigestão anaeróbia de cama de aviário.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Investigar a influência da utilização de digestatos como inóculos na biodigestão anaeróbia da cama de aviário.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar o potencial biometanogênico específico da cama de aviário;
- Avaliar tanto o uso de digestato como inóculo na biodigestão anaeróbia da cama de aviário, como a produção de biogás;
- Avaliar a influência dos inóculos (bovino e suíno) no processo de biodigestão anaeróbia da cama de aviário bem como a relação AV/AT, a relação AI/AP, a redução de sólidos, a redução de DQO, a produção de biogás, a produção específica de biogás e a produção de metano;
- Avaliar a progressão de carga (0,67; 1,00; e 1,67 gSV.L⁻¹dia⁻¹), nos diferentes inóculos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de frango

Dados do IBGE demonstram a evolução do abate de frangos no Brasil desde 2008 até 2014 e, pela Figura 1, observa-se que houve um leve decréscimo em 2014, comparado aos dois últimos trimestres de 2013.

A análise referente ao ano de 2014 aponta que foram abatidas 1,56 bilhões de cabeças de frango em comparação ao ano de 2013 com 1,46 bilhões. Logo, houve um aumento de 7,2%, considerável (SINDIVIAPAR, 2015).

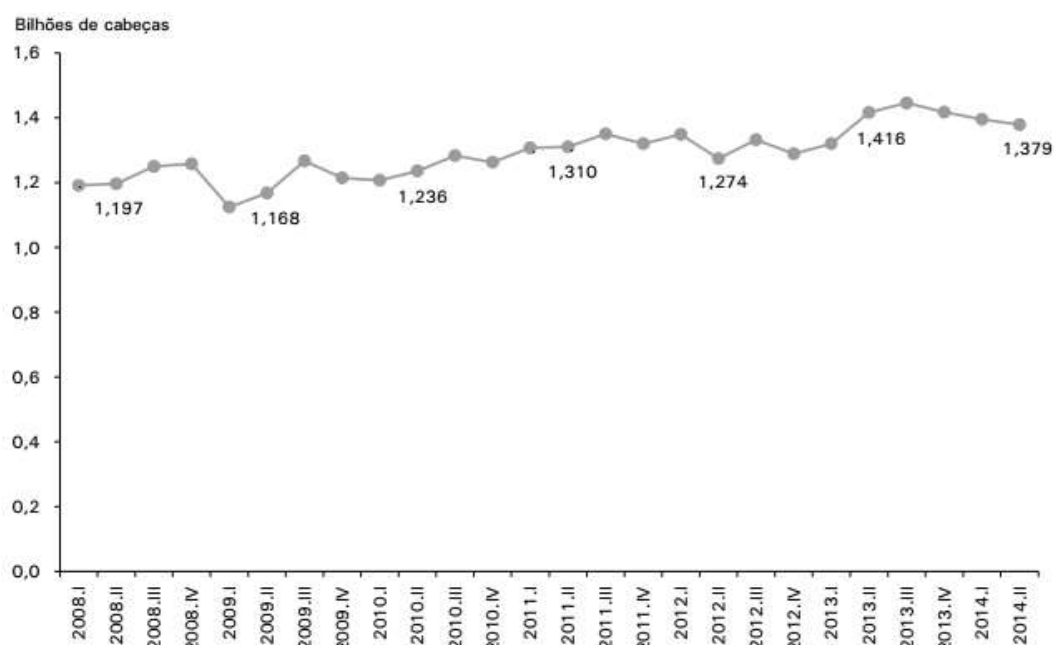


Figura 1 Evolução do abate de frangos por trimestre no Brasil de 2008 a 2014.

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Pesquisa trimestral do abate de animais, 2008. I- 2014. II.

Segundo dados da USDA (2014), em 2014, os principais países produtores de carne de frango foram os EUA, China e Brasil.

No Brasil, os Estados que registraram as maiores porcentagens de abate de frango em 2013 foram Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, respectivamente. Em 2014, os Estados mantiveram suas posições em relação à produção de frango, representando 31,25; 17,49 e 14,60 %, respectivamente, em relação ao total brasileiro de cinco bilhões de cabeças (UBA, 2014; SINDIVIAPAR, 2015).

O mesmo ocorreu em relação às exportações, quando, no 2º trimestre de 2013 e no mesmo período em 2014, o Paraná liderou as exportações de frangos para o mercado externo, vindo em sequência Santa Catarina e Rio Grande do Sul (IBGE, 2014).

Nesse contexto, a avicultura de corte é responsável pelo consumo de grande quantidade de recursos naturais, e consequentemente pela geração de resíduos, dentre

eles a cama de frango, que segundo o diagnóstico realizado no núcleo de aviários no Município de São Manoel do Paraná-PR, no ano de 2009, a quantidade gerada foi de 250.000 kg, representando um coeficiente de geração de 1,262 kg/ave (RINALDI et al.2012).

Contudo, à medida que a produção nacional de frangos aumenta, maiores quantidades de cama de aviário são geradas, com isso, é notória a necessidade de aumentar a eficiência do processo e reduzir os custos de produção (SANTOS et al. 2005; KUNZ & OLIVEIRA, 2006).

3.2 Cama de aviário (CA)

Anualmente, milhões de toneladas de resíduos sólidos são produzidas, sejam a partir de fontes municipais, industriais ou agrícolas: dentre todas as formas de resíduos sólidos orgânicos, o mais abundante é o esterco animal, principalmente de pequenas propriedades. A disposição inadequada desses resíduos pode resultar na contaminação em larga escala de terra, água e ar (NASIR, et al. 2012).

Assim, os problemas ambientais têm se intensificado, por isso, criou-se a necessidade de alternativas para minimizar os impactos e agregar valor aos resíduos gerados, pois as modificações ocorridas com as intensificações da avicultura industrial, além de produzir toneladas de alimentos, ocasionam um exacerbado aumento do volume de dejetos gerados por unidade de área (KUNZ & OLIVEIRA 2006; SILVEIRA et al. 2014).

A cama de aviário é utilizada na criação de frangos de corte com a finalidade de proporcionar um ambiente sanitariamente seguro ao plantel. Ela impede o contato direto com a umidade e com microrganismos que possam comprometer a saúde do animal. Porém, com seu uso, gera-se anualmente grande volume de resíduos (BOLAN et al. 2010; SUZUKI et al. 2012).

Entende-se como 'cama' todo o material distribuído em um aviário para servir de leito aos animais, mais especificamente chamada de cama de aviário (instalação avícola), e o material mais comumente utilizado é a maravalha ou cepilho de madeira (EMBRAPA, 2007). Podem ainda serem utilizados materiais alternativos tais como palhas de trigo e arroz, serragens, aparas de madeira e casca de arroz, já que esses materiais não afetam o desempenho das aves (BENABDELJELIL & AYACHI, 1996).

O resíduo gerado no processo de produção de frangos (excreta avícola) é composto por fezes, penas, restos de alimentos e, de acordo com a região, serragem, casca de amendoim, casca de arroz e outros materiais (SANCHUKI et al. 2011). Nesse sentido, é importante ressaltar o controle do pH da cama no processo de criação de frangos, pois a poluição atmosférica, oriunda da volatilização de amônia, que é ocasionada principalmente em pH elevados, afeta negativamente o desempenho das aves (CHOI & MORRE Jr., 2008).

Por muitos anos a excreta avícola foi utilizada para alimentação animal, mas no ano de 2004, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), pela Instrução Normativa nº 08, de 25 de março de 2004, proibiu em todo o território nacional a produção, a comercialização e a utilização de produtos destinados à alimentação de ruminantes que contenham em sua composição proteínas e gorduras de origem animal, incluindo a utilização da cama de aviário, em função, principalmente, da transmissão da doença Encefalopatia Espongiforme Bovina (EEB), conhecida como 'vaca louca'.

Assim, a reutilização da cama de aviário é uma alternativa viável para diminuir o impacto ambiental do acúmulo desse resíduo e para favorecer regiões em que há escassez do material. O número de lotes em que é possível reutilizá-la está relacionado ao aspecto sanitário, ou seja, não é recomendável reutilizar a cama quando o lote anterior passou por algum desafio sanitário. Portanto, dependendo de sua qualidade, volume e manejo, pode ser utilizada em até 12 lotes, sendo geralmente reutilizada por seis lotes consecutivos (FUKAYAMA, 2008; ÁVILA et al. 2007). A reciclagem dos resíduos no meio rural pode ser feita com base em dois objetivos: a reciclagem orgânica e de nutrientes ou reciclagem em energia (LUCAS JÚNIOR & SANTOS, 2000).

No caso da reciclagem orgânica e de nutrientes, Trazzi et al. (2012) relatam que o uso dos estercos de origem animal proporciona melhoria nos atributos químicos dos substratos e salientam que, para comprovar a potencialidade dos substratos formulados com esse material, é recomendado testar mudas florestais como indicadores biológicos.

Em relação à reciclagem em energia, uma alternativa é a biodigestão anaeróbia: processo pelo qual bactérias anaeróbias, em um ambiente desprovido de oxigênio, degradam a matéria orgânica. O processo tem sido amplamente aplicado para o tratamento de resíduos de operações agrícolas (ZIGANSHIN et al. 2013).

Segundo Sanchez (2005), o tratamento de resíduos de cama de frango por digestão anaeróbia tem várias vantagens, dentre elas:

- 1) o processo destrói parcialmente organismos patogênicos e parasitas;
- 2) tem-se como subprodutos o metano, que pode ser utilizado como fonte de energia, e o digestato, que pode ser usado como condicionador do solo;
- 3) gera menor quantidade de lodo quando comparada aos processos aeróbios em função da baixa produção de biomassa;
- 4) tem capacidade para estabilizar grandes volumes a baixo custo, além disso,
- 5) o processo é mais econômico quando comparado ao aeróbio, principalmente, em concentrações mais elevadas do que 4 g.L^{-1} de DQO.

Sendo assim, a avicultura é uma atividade com elevado consumo energético, porém, também tem a característica de produzir resíduos com considerável potencial energético, como a cama de aviário que, ao ser processada de forma a disponibilizar essa energia,

poderia contribuir para um equilíbrio energético nas operações que se desenvolvem dentro do galpão (SANTOS & LUCAS JÚNIOR, 2004).

Ademais, a biodigestão anaeróbia da cama de aviário é uma alternativa para o produtor avícola adequar o sistema de tratamento de resíduos às legislações ambientais vigentes e obter a sustentabilidade energética da granja (AIRES et al. 2013).

Segundo Chen et al. (2008), a digestão anaeróbia tem sido amplamente aplicada para o tratamento de resíduos de operações agrícolas e industriais. É uma tecnologia de tratamento de resíduos eficiente que aproveita a decomposição anaeróbia natural, reduz o volume de resíduos e gera biogás ao mesmo tempo.

Fukayama et al. (2009) avaliaram a produção de biogás em camas reutilizadas de frangos de corte criados em diferentes épocas, e observaram que os valores de produção foram 0,401; 0,410; 0,400 e 0,520 m³ de biogás.kgSV⁻¹ adicionados, para 1º; 2º; 3º e 4º lotes, respectivamente. Assim, conclui-se que há aumento na produção de biogás com a reutilização da cama de frango de corte.

Tessaro (2011) testou em seu trabalho três tratamentos para determinar a capacidade de produção do biogás, sendo eles: T₁: cama de aviário + digestato de bovinos + água; T₂: cama de aviário + digestato e T₃: cama de aviário + água. Observou-se que a biomassa utilizada foi capaz de produzir biogás nos três sistemas de tratamento, e obteve maior produção em T₂. Concluiu-se que o uso de cama de aviário é uma alternativa viável na produção de biogás e o biogás produzido pode substituir os combustíveis tradicionais e a energia elétrica consumida nas propriedades avícolas da região Sudoeste do Paraná.

Costa et al. (2012) testaram a biodegradabilidade anaeróbia da cama de frango usando diferentes concentrações de sólidos totais: 1,0; 2,5 e 5,0 %. O inóculo foi adicionado para os ensaios a uma concentração final de 6,6 g.L⁻¹ SV. Concluíram que o potencial biometanogênico de cama de frango com 1% de ST e inóculo na proporção de 0,72 gSV por grama de SV adicionado foi de 145 ± 14 L_{metano}.kg⁻¹.

Kelleher et al. (2002) apresentaram uma revisão em relação aos avanços nas três principais vias utilizadas para cama de frango para otimização de compostagem, digestão anaeróbia e queima direta. Concluíram que tais tecnologias abrem maiores oportunidades para a comercialização da energia e nutrientes em cama de frango para usos agrícolas e não agrícolas, especificamente a digestão anaeróbia de esterco de galinha que se mostrou uma opção viável, desde que monitoradas as condições de operação.

3.3 Biodigestão anaeróbia

O tratamento anaeróbio de resíduos agrícolas é um método alternativo para a recuperação de energia e minimização da poluição (CAMARERO et al. 1996). É uma técnica bem estabelecida para a produção de energia renovável e quando aplicada a gestão de

resíduos, além da produção de energia, traz como benefício o tratamento de resíduos (CHINELLATO et al. 2013).

No processo de biodigestão, as bactérias anaeróbias degradam a matéria orgânica em um ambiente desprovido de oxigênio, o biodigestor (CATARINO et al. 2009), o qual consiste, basicamente, em uma câmara fechada onde a biomassa é fermentada a fim de produzir biogás e digestato (GASPAR, 2003). A matéria orgânica é convertida a uma forma mais oxidada (CO_2) e em outra forma mais reduzida (CH_4). No entanto, a maior parte do metano é desprendida para a fase gasosa (SPERLING, 1996).

A conversão anaeróbia desenvolve-se em quatro etapas: a primeira delas é chamada de hidrólise, onde os substratos orgânicos complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, são convertidos em compostos orgânicos mais simples - aminoácidos, monossacarídeos e ácidos graxos (SPERLING, 1996; CARREAS, 2013).

Os pré-tratamentos físico-químicos, cujo principal efeito é a redução do tamanho das partículas, produzem aumento da taxa de hidrólise, fase limitante do processo anaeróbico principalmente para cama de frango (CARREAS, 2013).

Na fase acidogênica, a matéria orgânica é convertida a ácidos orgânicos por bactérias denominadas *acidogênicas*, em que ocorre a fermentação das moléculas orgânicas em compostos como acético, fórmico e gás hidrogênio. Esses são utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas e compostos orgânicos mais reduzidos (ácido propiônico, ácido valérico, ácido láctico e etanol, principalmente), os quais são oxidados por bactérias acetogênicas na etapa seguinte do processo (SPERLING, 1996; CARREAS, 2013).

Na terceira etapa, conhecida como acetogênese, o ácido propiônico, ácido butírico e álcoois, dentre outros, são transformados pelas bactérias acetogênicas em hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético (CARREAS, 2013).

Na última etapa, chamada fase metanogênica, os ácidos orgânicos são convertidos a metano, gás carbônico e água, e é realizada pelas arqueas metanogênicas (SPERLING, 1996).

Segundo Shah et al. (2014), existem dois grupos de arqueas metanogênicas na última fase: as metanogênicas acetoclásticas, que degradam acetato em metano e dióxido de carbono; e as metanogênicas hidrogenotróficas, que usam dióxido de carbono (como aceptor) e o hidrogênio (como doador) para produção de metano. A principal via de formação do metano ocorre no grupo metanogênicas acetoclásticas, com cerca de 70% do metano produzido (CARREAS, 2013). Segundo Jang et al. (2014), a contribuição da produção de metano em cada um dos grupos depende das condições do processo, tais como: concentração de substratos, carga orgânica, etc.

Kelleher et al. (2002) consideram resumidamente duas etapas (Figura 2): a primeira onde os compostos complexos são hidrolisados a compostos orgânicos simples –

fermentação ácida e a segunda etapa onde os produtos da hidrólise são convertidos em gases (principalmente metano e dióxido de carbono) por bactérias estritamente anaeróbias - fermentação de metano.

Na Figura 2, tem-se a sequência das etapas envolvidas na digestão anaeróbia.

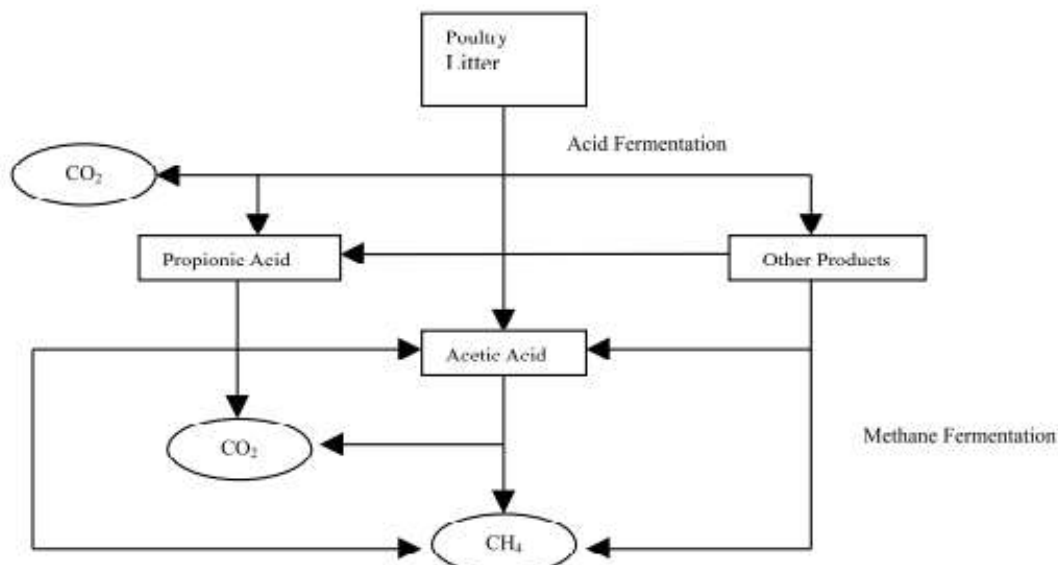


Figura 2 Etapas da Digestão Anaeróbia
Fonte: Kelleher et al. 2002.

Embora a digestão anaeróbia tenha sido comprovada e estabelecida como um método para degradar uma variedade de poluentes e resíduos orgânicos, é um processo complexo que exige operação cuidadosa e monitoramento de parâmetros, tais como: pH, alcalinidade, temperatura, ácidos graxos voláteis, carga orgânica, tempos de retenção hidráulica, composição do biogás, etc. (YETILMEZSOY, 2012).

Sanchez et al. (2012) determinaram a influência de temperatura, agitação, concentração de lodo, e tempo de retenção de sólidos (TRS) para a obtenção de matéria orgânica facilmente biodegradável na fase primária de fermentação, observando-se que a influência de cada parâmetro operacional foi claramente observada na hidrólise.

Além disso, a ausência de nutrientes ou a presença de compostos tóxicos prejudica os microrganismos de crescimento lento, resultando no acúmulo de ácidos graxos voláteis e na redução da produção de metano (AQUINO & CHERNICHARO, 2005).

Kuczman et al. (2011) avaliaram em seu trabalho a produção de biogás a partir da manipueira ao aumentarem as cargas orgânicas e os volumes de alimentação. Foi realizado o acompanhamento da aclimação dos microrganismos a partir do monitoramento dos valores da relação Acidez volátil e Alcalinidade total (AV/AT), pelo fato de que a relação se manteve em média no intervalo 0,14 a 0,30.

Chen et al. (2008) elaboraram uma revisão referente ao assunto e mencionaram diversos fatores que podem inibir ou influenciar o processo de biodigestão, dentre eles, concentração de amônia, temperatura, pH, metais pesados e aclimação.

Existem, atualmente, diversos modelos de biodigestores, cada um adaptado a uma realidade e a uma necessidade de biogás, os quais criam condições para que bactérias metanogênicas atuem sobre materiais orgânicos na produção deste combustível (SILVEIRA et al. 2014; GASPAR, 2003).

Em relação ao abastecimento de biomassa, o biodigestor pode ser classificado como contínuo (abastecimento diário de biomassa), com descarga proporcional à entrada de biomassa, ou intermitente, quando esse utiliza a capacidade máxima de armazenamento de biomassa, restando-a até a completa biodigestão. Então, retiram-se os restos da digestão e faz-se nova recarga (GASPAR, 2003).

Em ambos os casos são obtidos produtos com elevado valor agregado: biogás e digestato. O biogás, produzido a partir da biodigestão da cama de aviário, pode ser utilizado para o aquecimento dos pintinhos, através de simples queimadores a gás, que efetuarão a combustão do biogás e consequente produção de calor, indispensável nas duas primeiras semanas do ciclo, além da implantação de geradores a biogás capazes de promover o funcionamento dos sistemas de alimentação, iluminação e ventilação das granjas (CATARINO, R.P. et al.2009).

Assim, a digestão anaeróbia de resíduos de aves pode ser financeiramente viável, pois, ao invés dos resíduos serem um problema, a cama de aviário pode e deve ser uma fonte de nutrientes e de energia (KELLEHER et al. 2002). Geralmente, considera-se que o biogás é constituído principalmente por metano (50-60%) e dióxido de carbono (30-40%) e, em menor proporção, por nitrogênio (0-3%), hidrogênio (0-1%), oxigênio (0-1%), compostos orgânicos voláteis (vestígios) e sulfureto de hidrogênio (CARREAS, 2013).

Orrico Júnior et al. (2010) avaliaram a produção de biogás, o potencial de produção e a qualidade do digestato obtidos com a biodigestão anaeróbia dos resíduos da cama de aviário e carcaças de aves pré-compostadas. Observaram reduções acentuadas nos teores de SV, em média 44,05%, demonstrando a eficiência da biodigestão anaeróbia na degradação de compostos resistentes, como a cama de frangos. No entanto, do ponto de vista de produção de gás, a biodigestão anaeróbia dos resíduos de cama de frango e carcaças de aves pré-compostadas não demonstrou grande eficiência.

Chiabai Junior et al. (2013) avaliaram a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, usando o substrato com os resíduos das aves, inóculo e água nas proporções de ST de 2, 4, 6 e 8%, respectivamente. Verificaram que a concentração de 8% de ST apresentou a melhor produção média de biogás ao final dos 21 dias de biodigestão. As produções de biogás para as concentrações de ST de 2%, 4%, 6% e 8% foram de 0,95; 9,45; 13,25 e 21,03 L.dia⁻¹, respectivamente.

Os métodos volumétricos podem ser utilizados para a medição de biogás, conforme utilizados no teste da análise metanogênica específica (AME). E baseiam-se na determinação do volume de biogás ou metano produzido, sendo que a literatura reporta três metodologias comumente utilizadas: a medição do volume e composição do biogás; medição apenas da composição do biogás, medição direta do volume de metano. A única diferença entre o primeiro e o último é que para medir-se apenas o volume de metano, deve-se lavar o biogás com solução de hidróxido de sódio para que haja a absorção do dióxido de carbono (AQUINO et al. 2007). Recomenda-se para a coleta de biogás, a utilização de frascos de Mariotte, por serem de fácil manuseio e apresentarem resultados confiáveis (BARCELOS, 2009)

Silveira et al. (2014) avaliaram a produção de biogás em mini-biodigestores feitos de garrafas PET, abastecidos com cama de aviário para simular o aproveitamento de dejetos provenientes da avicultura. Utilizaram três tratamentos cuja quantidade de água variou em 90, 80 e 70%. E concluíram que o tratamento com 70% de água e 30% de esterco de ave apresentou melhor desempenho na produção total de biogás (6353,3 mL). E, ao se fazer a relação da produção com a massa de esterco, o resultado corresponde a $0,032 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$.

Contudo, após a produção do biogás, a biomassa fermentada deixa o interior do biodigestor sob a forma líquida, com grande poder de fertilização. Geralmente, este digestato é aplicado no solo para melhorar as qualidades físicas, químicas e biológicas do mesmo (GASPAR, 2003). A revisão indica claramente que a digestão anaeróbia é um eficaz processo biológico no tratamento de resíduos sólidos orgânicos. No entanto, diferentes fatores e dinâmicas microbianas contribuem para sua eficiência, a qual tem de ser otimizada para alcançar ao máximo os benefícios desta tecnologia, principalmente em termos de produção de energia e gestão de resíduos (KHALID et al.2011).

Nesse sentido, estudos recentes avaliam o potencial da utilização de efluentes da biodigestão anaeróbia de cama de aviário como meio de crescimento nutricional de microalgas (SINGH et al. 2011). Além disso, esse efluente da biodigestão, muito utilizado como digestato, pode ser usado como importante inóculo em processos de biodigestão anaeróbia (COSTA et al. 2011).

3.4 Inóculo

A partida de operação de um biodigestor é um aspecto crucial para o sucesso no tratamento de resíduos, pois está relacionada com a existência de uma população microbiana que pode ser suprida por microrganismos presentes no próprio resíduo (inóculo natural), ou pela utilização de inóculos de outras fontes (STEIL, 2001).

A utilização de inóculo é um processo de tratamento conjunto, por digestão anaeróbia, com diferentes tipos de substratos, os quais se compensam quanto às suas

características físico-químicas e aumentam a produção de biogás (BARCELOS, 2009). Os inóculos desempenham um papel importante no início do processo anaeróbio, pois equilibram as populações de microrganismos (SHAH et al. 2014).

Segundo Xavier et al. (2010), vários estudos têm sido realizados com o objetivo de aumentar a produção de biogás e a adição de inóculo é um dos métodos que consistem em utilizar parte do material já processado, que seja capaz de fornecer ao novo substrato uma população adicional de microrganismos típicos da biodigestão anaeróbia.

O inóculo tem a função de acelerar o processo, principalmente em materiais de baixa biodegradabilidade (altos teores de celulose e lignina). Podem ser utilizados digestatos bovinos, de aves, suínos, e outros desde que contenham flora microbiana de bactérias acidogênicas e metanogênicas (PALHARES, 2005). Os inóculos geralmente utilizados são lodos de esgoto sanitário e materiais de origem animal, como: esterco bovino, suíno e de frango, ricos em microrganismos anaeróbios (BARCELOS, 2009). E, em função da existência de grandes quantidades de microrganismos anaeróbios no trato digestivo, eliminados nas fezes, os inóculos provenientes de dejetos de animais ruminantes propiciam partida e produção de biogás mais rápidas quando submetidos à digestão anaeróbia (STEIL, 2001).

O esterco já biofertilizado de bovinos, aves, suínos pode ser utilizado como inóculo, principalmente, quando os resíduos são materiais difíceis de serem digeridos, em decorrência dos elevados teores de celulose e lignina, como os presentes na cama de frango (COSTA et al. 2011).

Bueno (2010) comparou dois biodigestores em batelada para a produção de biogás utilizando estrume bovino em duas concentrações 1:2 e 1:1 (estrume: água). E, para a aclimação, os substratos foram colocados em biodigestores vedados e, para a remoção de traços de O_2 , permaneceram em repouso por 24 horas, à temperatura de 20 °C. O autor concluiu que o volume produzido de biogás foi maior para a diluição 1:2, evidenciando que a diluição tem papel fundamental na produção de biogás.

Dotto & Wolff (2012) desenvolveram um biodigestor anaeróbio em escala experimental e de alimentação intermitente. O biodigestor foi alimentado inicialmente com 80 kg de esterco bovino, proveniente de um abatedouro, misturado com 374L de água, e observaram que o esterco bovino apresentou bom desempenho como inóculo de microrganismos e matéria orgânica de partida do biodigestor.

Oliveira et al. (2011) avaliaram os benefícios do uso de diferentes doses de enzimas (0; 0,5; 1,0 e 1,5 g L^{-1} do volume de carga diária) e tempos de retenção hidráulica (7, 14 e 21 dias) sobre a produção de biogás e a redução do poder poluente do efluente de abatedouro avícola. Para adaptação mais rápida da biomassa ao substrato, os autores produziram o inóculo utilizando-se uma mistura de dejetos bovinos e efluente de abatedouro avícola, na proporção de 40:60, respectivamente.

Xavier et al. (2010) avaliaram a adição de inóculo em biodigestores operados em batelada com dejetos de vacas leiteiras, em diferentes períodos do ano. Recomendaram a adição de 40% de inóculo (v/v) (oriundo de um biodigestor operado com dejetos de vacas leiteiras) junto aos substratos para tratamento e/ou reciclagem de dejetos de vacas leiteiras em lactação, para a maior produção de biogás (0,07 m³ por kg de dejetos). A adição desse nível de inóculo permitiu as maiores produções de biogás, nos períodos intermediário, chuvoso e seco do ano.

Barcelos (2009) investigou o potencial de aplicação do esterco bovino, suíno e rúmen bovino como inóculo da digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos (RSU). E observou que a maior produção total de biogás aconteceu no biodigestor inoculado com rúmen bovino (144 L), seguido da testemunha (137 L), esterco suíno (122 L) e, por último, esterco bovino (117 L). Concluiu que, apesar da partida da digestão anaeróbia não ter sido acelerada, os inóculos podem ser utilizados, pois auxiliaram na manutenção do pH e umidade e favoreceram a elevada produção de biogás.

Segundo Shah et al. (2014), a fonte de inóculo afeta a quantidade de produção de biogás e também influencia na velocidade do processo da digestão anaeróbia.

Segundo Yadvika et al. (2004), algumas tentativas foram feitas no passado para aumentar a produção de gás, estimular a atividade microbiana com o uso de vários aditivos químicos e biológicos que estão naturalmente disponíveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do experimento

O experimento foi realizado no Laboratório de Biorreatores do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (RHESA) da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) Campus de Cascavel/PR.

4.2 Cama de aviário (CA)

O resíduo utilizado no experimento foi a cama de aviário (CA), previamente coletada em uma propriedade em Novo Três Passos, no município de Quatro Pontes – PR, a qual havia sido reutilizada por nove lotes. O aviário pertence a uma cooperativa agrícola, a qual tem como hábito utilizar apenas uma camada de 8 cm de maravalha no início do lote, sem sucessivas adições para não prejudicar sua reutilização.

A cama de aviário foi previamente caracterizada de acordo com os seguintes parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), umidade, sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV), demanda química de oxigênio (DQO) e nutrientes. Os resultados referentes às características físico-químicas e de nutrientes da cama de aviário (CA) estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 Caracterização físico-química e de nutrientes da cama de aviário (CA)

Características	CA - Neste estudo	Outros Estudos	
pH	7,90	Alcântara (2012)	7,16
ST (%)	85,00	Alcântara (2012)	80,33
STF (%)	36,00	-	-
STV (%)	79,00	Alcântara (2012)	77,40
Umidade (%)	12,30	-	-
DQO (mg.L ⁻¹)	7306,36	-	-
Zn (mg.kg ⁻¹)	647,75	Bortolini (2014)	300,00
Fe (mg.kg ⁻¹)	3769,18	Bortolini (2014)	7027,00
Cu (mg.kg ⁻¹)	53,21	Bortolini (2014)	416,00
Mn (mg.kg ⁻¹)	518,11	Bortolini (2014)	382,00
K (mg.kg ⁻¹)	38298,25	Tessaro et al. (2015)	26300,00
Mg (mg.kg ⁻¹)	6754,52	Tessaro et al. (2015)	5070,00
Na (mg.kg ⁻¹)	7114,87	-	-
Ca (mg.kg ⁻¹)	40755,70	Tessaro et al. (2015)	23600,00
N (%)	1,80	Bortolini (2014)	1,9
C/N	24	Bortolini (2014)	19,5

De acordo com os dados da Tabela 1, é possível verificar que os resultados da cama de aviário são semelhantes aos apresentados pelos demais autores, principalmente em relação à porcentagem de STV, apresentada por Alcântara (2012). E, para o abastecimento dos biodigestores, a cama passou por pré-tratamento, com destorroamento e peneiramento para aumentar a superfície de contato, a fim de facilitar o processo de biodigestão anaeróbia, mais especificamente a fase de hidrólise, considerada a fase crítica do processo de biodigestão (Figura 3).



Figura 3 Cama de aviário utilizada no experimento.

4.3 Inóculo

Foram utilizados neste experimento dois tipos de inóculo (IN), o inóculo suíno (S) oriundo de um biodigestor de suinocultura de uma empresa instalada na cidade de Cascavel-PR, e o inóculo bovino (B), oriundo de um biodigestor de uma empresa instalada na cidade de Céu Azul-PR. As fontes de inóculo foram utilizadas em função da disponibilidade na região, e ambos foram coletados na saída do biodigestor, ou seja, o próprio digestato, era oriundo da biodigestão.

Os inóculos foram caracterizados de acordo com potencial hidrogeniônico (pH), sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV), e nutrientes, conforme a Tabela 2. Observa-se que as concentrações de nutrientes dos inóculos são muito próximas, e ambos apresentaram pH próximo à neutralidade.

Tabela 2 Caracterização físico-química e de nutrientes do inóculo bovino (B) e suíno (S)

Características	B ²	S ¹	S ²
pH	7,34	8,00	7,65
ST (g.L ⁻¹)	5,44	2,63	2,46
STF (g.L ⁻¹)	2,65	1,89	1,78
STV (g.L ⁻¹)	2,79	0,74	0,68
Zn (mg.L ⁻¹)	3,91	-	5,92
Fe (mg.L ⁻¹)	5,73	-	1,53
Cu (mg.L ⁻¹)	3,03	-	1,46
Mn (mg.L ⁻¹)	1,98	-	1,58
K (mg.L ⁻¹)	480,58	-	467,67
Mg (mg.L ⁻¹)	178,72	-	66,18
Na (mg.L ⁻¹)	170,77	-	167,03
Ca (mg.L ⁻¹)	406,21	-	285,17

*Nota: ¹ dados da 1ª coleta, ² dados da 2ª coleta, utilizados nas fases experimentais I e II, respectivamente.

4.4 Fase Experimental I

4.4.1 Determinação do potencial biometanogênico específico (BMP)

O potencial biometanogênico específico (BMP) da cama de aviário foi mensurado com base nos parâmetros estabelecidos segundo a norma VDI 4630 (Verein Deutscher Ingenieure, 2006), com o intuito de determinar a possibilidade de produção de biogás e a degradabilidade biológica anaeróbia da cama de aviário a ser utilizada como substrato no processo de biodigestão bem como seu efeito inibitório em determinado intervalo de tempo.

4.4.2 Teste do uso de digestatos como inóculos

Conduziu-se um experimento utilizando seis biodigestores com o intuito de avaliar a utilização de digestato como inóculo no processo de biodigestão da cama de aviário. Os biodigestores foram construídos em cloreto de polivinila (PVC) com volume útil aproximado de 60 L, operados na direção horizontal, com uma entrada para a alimentação e uma saída para o afluente, conforme mostra a Figura 4. A temperatura considerada foi a ambiente.

Optou-se, em função da disponibilidade de coleta na região, pela utilização do inóculo suíno (S) para a realização do teste.



Figura 4 Biodigestor PVC de 60L.

Cada biodigestor foi acoplado a um gasômetro (Figura 5), construído em PVC, o qual possuía um filme de água a fim de reter o biogás e possibilitar a sua quantificação com base no deslocamento vertical diário.



Figura 5 Gasômetro em PVC.

Foram considerados seis tratamentos, que representavam diferentes porcentagens de inoculação (Tabela 3) e as alimentações diárias foram realizadas nos biodigestores e consideradas como repetições.

Tabela 3 Condições de inoculação empregadas no experimento

Tratamentos	Condições de inoculação
T ₁	água + Cama de Aviário (CA)
T ₂	água + 10 % Inóculo + (CA)
T ₃	água + 15 % Inóculo + (CA)
T ₄	água + 20 % Inóculo + (CA)
T ₅	água + 25 % Inóculo + (CA)
T ₆	água + 30 % Inóculo + (CA)

Utilizou-se um teor de sólidos totais de 8% para o abastecimento dos biodigestores, com alimentação semi-contínua, realizada diariamente, carga de 0,75 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e concentração de 1,5% de SV na mistura.

Na Tabela 4, são apresentados os valores de cada componente no preparo dos substratos, considerando a densidade da cama de aviário de 0,52 g/mL.

Tabela 4 Quantidades de cada componente utilizado na mistura de abastecimento.

Tratamentos	Resíduos (kg)	Água (kg)	Inóculo (kg)
T ₀	6,00	48,50	0,00
T ₁	5,80	42,80	6,00
T ₂	5,70	40,00	9,00
T ₃	5,60	37,20	12,00
T ₄	5,50	34,40	15,00
T ₅	5,41	31,60	18,00

O experimento foi operado de setembro a novembro/2014, e os biodigestores foram mantidos em modo batelada em torno de 50 dias após abastecimento, quando foi constatada a produção de biogás, pelo teste da queima. O processo de biodigestão foi acompanhado por monitoramento diário da produção de biogás, pH e temperatura, durante 24 dias.

A determinação de produção de biogás foi medida pelo deslocamento vertical dos gasômetros e posterior multiplicação pela área da seção transversal interna dos mesmos. Após cada leitura, esses eram zerados e, depois, era realizada a correção do volume de

biogás para as condições normais de temperatura e pressão, 1 atm e 273,15 K, efetuada com base na equação de Clapeyron (1):

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2} \quad \text{Eq.(1)}$$

em que:

P_1 = Pressão em condições normais (1 atm);

T_1 = Temperatura em condições normais (273 K);

V_1 = Volume de biogás corrigido;

P_2 = Pressão obtida no momento da leitura de biogás;

T_2 = Temperatura obtida no momento da leitura de biogás;

V_2 = Volume de biogás medido no momento da leitura.

4.5 Fase Experimental II

Para essa fase, foram construídos dois biodigestores, em cloreto de polivinila (PVC), nas dimensões 0,60 m x 0,10 m (comp. x diâmetro), os quais foram operados na direção horizontal com 4 L de volume útil. A Figura 6 representa o modelo de biodigestor utilizado no experimento, contendo uma entrada para a alimentação, uma saída para o efluente (potencial digestato) e outra saída para o biogás gerado. A temperatura considerada foi a ambiente.



Figura 6 Biodigestor PVC de 4L

O experimento foi operado de fevereiro a agosto/2015 e, para a partida, os biodigestores foram inoculados com 30% do volume útil, ou seja, 30% foi ocupado com inóculo e 70% com uma mistura de água com cama de aviário na proporção de 50 g de cama de aviário completado com água até o volume de 1 L.

Após realizada a inoculação de um biodigestor com o inóculo suíno (S) e outro com inóculo bovino (B), esperou-se um tempo de 24 horas para a completa remoção de traços de oxigênio, e então, foi dado início à alimentação dos mesmos utilizando o resíduo de

cama aviário. Os biodigestores foram alimentados diariamente, em regime semi-contínuo e de forma manual, de acordo com as cargas definidas, sendo que a quantidade de cama de aviário necessária para a alimentação foi pesada e diluída em água diariamente.

Com base em estudos realizados no próprio grupo de pesquisa, foram definidas três cargas 0,67; 1,00 e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ a serem testadas, considerando-se sempre a concentração de 2% de sólidos voláteis (SV) na mistura, e o tempo de operação de cada carga de 74, 69 e 66 dias, respectivamente.

Logo, os parâmetros apresentados na Tabela 5 foram calculados com base nas equações 2 e 3:

$$COV = \frac{C \times Q}{V_b} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$TDH = \frac{V_b}{Q} \quad \text{Eq.(3)}$$

em que:

COV: Carga orgânica volumétrica (gSV.L⁻¹.dia⁻¹),

C: Concentração em SV (g.L⁻¹),

V_b: Volume útil do biodigestor (L),

Q: Vazão de alimentação (L.dia⁻¹),

TDH: Tempo de detenção hidráulica (dia).

Tabela 5 Parâmetros considerados nos biodigestores

Parâmetros	B	S
Inóculo (30% v/v)	Bovino	Suíno
Volume Útil (L)	4	4
Concentração SV (g.L ⁻¹)	20	20
Cargas (gSV.L ⁻¹ .dia ⁻¹)	0,67; 1,00; e 1,67	0,67; 1,00; e 1,67
Q (mL.dia ⁻¹)	133,33; 200,0; e 333,33	133,33; 200,0; e 333,33
TDH (dias)	30, 20 e 12	30, 20 e 12

Observa-se na Tabela 5 que as condições de operação para os dois biodigestores foram as mesmas, exceto o tipo de inóculo utilizado. O método de deslocamento de volume utilizando frascos de Mariotte foi utilizado para medir a produção do biogás, assim, um frasco Mariotte foi acoplado a cada biodigestor, como apresentado na Figura 7.



Figura 7 Frasco de Mariotte

A lavagem do biogás foi realizada com solução de hidróxido de sódio (NaOH) para mensurar a produção de metano com o objetivo de dissolver o dióxido de carbono (CO₂) e possibilitar a passagem de outros gases, como o metano.



Figura 8 Estrutura Experimental

A estrutura utilizada é apresentada na Figura 8, cujo monitoramento do processo de biodigestão anaeróbia é realizado conforme as metodologias e periodicidade apresentadas na Tabela 6. As metodologias estão descritas no item 4.9.

Tabela 6 Parâmetros, metodologias e periodicidade de monitoramento.

Parâmetro	Metodologia	Periodicidade
pH	pHmetro	Diariamente
Acidez volátil	Titulométrico - SILVA (1977)	Estabilização: Diariamente Operação: 3 vezes por semana
Alcalinidade Total	Titulométrico - SILVA (1977)	Estabilidade: Diariamente Operação: 3 vezes por semana
ST, STF e STV	Método Gravimétrico 2540 (APHA,1998)	3 vezes por semana
DQO	Método Colorimétrico 5220 (APHA,1998)	3 vezes por semana
Nitrogênio Amoniacal	Método Titulométrico 4500-NH ₃ (APHA,1998)	3 coletas por carga

4.9 Metodologia

4.9.1 Potencial biometanogênico específico

A determinação do potencial biometanogênico específico (BMP) ocorreu quando foram utilizados os procedimentos padrões descritos na norma VDI 4630 (2006), a qual recomenda o uso de inóculo aclimatado, condições de biodigestão controladas e também o controle positivo em celulose microcristalina de elevada pureza.

4.9.2 Potencial hidrogeniônico

O pH foi determinado diariamente, nas amostras de saída dos biodigestores, utilizando-se um pHmetro de bancada (modelo Tec 3MP).

4.9.3 Relação acidez volátil e alcalinidade total

A alcalinidade de uma solução é a medida de sua capacidade para neutralizar ácidos devido à presença de bases de sais de ácidos inorgânicos fracos e de sais de ácidos

voláteis e não voláteis, e foram determinadas tanto a alcalinidade parcial ($5,75 < \text{pH inicial} < 8,0$) como a alcalinidade intermediária ($4,30 < \text{pH} < 5,75$) pelo método volumétrico.

Do mesmo modo foi realizada a determinação de ácidos voláteis: para tal o pH foi reduzido para 3 e submetida a amostra à fervura por três minutos e empregada a mesma amostra da medição da alcalinidade. Após a fervura, a titulação com solução de hidróxido de sódio (NaOH) foi realizada e anotados os volumes gastos entre pH 4 e pH 7. Com isso, é possível monitorar o processo através da relação AV/AT e da relação AI/AP, pois segundo Silva (1997), a relação AV/AT deve manter-se entre 0,1 e 0,5 e segundo Riplay et al. (1986), os valores de AI/AP superiores a 0,3 indicam distúrbios no processo de biodigestão.

4.9.4 Sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis

A análise de sólidos totais (ST) interpreta quantitativamente a presença total de matéria que não seja água (dissolvida, coloidal ou em suspensão). O resultado dos sólidos totais obtidos pela pesagem do resíduo via evaporação de uma amostra corresponde à fase seca. Basicamente, consiste em calcinar a amostra em capsula de porcelana em mufla a 550 °C por cerca de 20 minutos, transferir para um dessecador e deixar esfriar por, no mínimo, uma hora e posteriormente realiza-se a pesagem (P1).

Em seguida, agita-se bem a amostra e transfere-se 100 mL para a capsula anteriormente pesada. Coloca-se a capsula com o resíduo em estufa a 105 °C até atingir massa constante (aproximadamente 24 horas) e, transfere-se novamente para o dessecador até esfriar, posteriormente, pesa-se e anota-se a massa em gramas (P2).

O material obtido na determinação de sólidos totais é submetido à ignição a 550 °C por, no máximo duas horas, e leva-se ao dessecador novamente por no mínimo uma hora, para posteriormente anotar-se a massa (P3). Assim, a fração orgânica será oxidada e eliminada como gás (em função da alta temperatura) e a fração inorgânica permanecerá como cinzas, obtendo-se assim os sólidos totais fixos (STF). Por fim, a partir da diferença entre os ST e STF, têm-se os sólidos totais voláteis (STV) que se referem ao conteúdo orgânico dos sólidos em suspensão (Método 2540 - APHA,1998).

4.9.5 Demanda química de oxigênio (DQO)

A metodologia consiste em adicionar, em um tubo de ensaio, 2,5 mL da amostra a ser analisada, 1,5 mL da solução digestora (altas ou baixas concentrações) e 3,5 mL do reagente ácido no caso do branco; e ao invés de se adicionar a amostra a ser analisada, é preciso preparar o tubo de ensaio com água destilada. Os tubos de ensaio são colocados em bloco digestor pré-aquecido a uma temperatura de 150 °C por duas horas. Assim, depois que os tubos de ensaio esfriaram, realizou-se a leitura (600 nm ou 420 nm) em

espectrofotômetro (Método 5220D - APHA,1998). E para determinar a redução de DQO, o valor da DQO de entrada foi subtraído pelo valor de DQO de saída, o qual foi multiplicado por 100 a fim de se determinar a porcentagem de redução.

4.9.6 Nitrogênio Total Kjeldahl

Em tubo micro-Kjeldahl, pipetam-se 5 ml da amostra e adicionam-se 3 mL da solução tampão, adicionam-se 10 mL da solução digestora e digere-se a solução em bloco digestor até que a solução se torne transparente e verde pálido (por aproximadamente 2 horas), e espera-se que as amostras resfriem. Transfere-se a amostra para o aparelho de destilação e adicionam-se 10 mL do hidróxido de sódio (6N), destilam-se e coletam-se entre 30 a 40 mL. Adicionam-se ácido bórico e fenolftaleína e titula-se com ácido sulfúrico e anota-se o volume gasto. No caso de amostras sólidas, como a cama de aviário, utiliza-se 0,2 gramas (Método 4500-N - APHA,1998).

4.9.7 Nitrogênio amoniacal

O procedimento adotado foi o de utilizar 25 mL de amostra, adicionar solução de hidróxido de sódio (NaOH) para ajustar pH (3 mL) e quatro (4) gotas do indicador fenolftaleína, destilar em aparelho digestor, coletar o destilado juntamente com 50 mL da solução indicadora de ácido bórico e, por fim, titular a amônia no destilado com solução de ácido sulfúrico (Método 4500-NH₃ – Titulométrico, APHA,1998).

4.9.8 Macro e Micronutrientes

Foi realizada a digestão nitro-perclórica (3:1) das amostras e retirada uma alíquota para leitura no equipamento de absorção atômica para determinar as concentrações de Zn, Fe, Cu, Mn, K, Mg, Na e Ca.

4.9.9 Produção de biogás

O monitoramento diário do volume de biogás produzido foi determinado medindo-se a altura do volume deslocado do gasômetro na fase experimental I, e na fase experimental II através do volume de solução salina deslocada em cada do frasco de Mariotte.

Em ambos os casos, a correção do volume de biogás para as condições normais de temperatura e pressão (CNTP) foi efetuada com base na equação de Clapeyron, já descrita no item 4.4.2.

4.9.10 Produção de metano

O volume de metano foi determinado quando se realizou a lavagem do biogás produzido nos últimos cinco dias, com solução de hidróxido de sódio (NaOH) concentrada. Segundo Aquino et al. (2007), esse procedimento assume que o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) são os principais constituintes do biogás. Essa consideração é válida uma vez que, em pH neutro, a maior parte da amônia e metade do sulfeto de hidrogênio, se presentes, estarão ionizados e dissolvidos na fase líquida.

4.9.11 Fração fibrosa

As fibras foram determinadas pelo método sequencial de fibras, de Van Soest, P. J. (1994) adaptado por Campos et al. (2004). O preparo da amostra consistiu em calcinar os saquinhos (Filter Bags – F57) e pesar 0,5 grama de amostra em cada saquinho, selando-os.

Foi empregado o equipamento digestor de fibras, para que, primeiramente, fosse determinada a fibra em detergente neutro (FDN) 01h20min h e 96 °C de agitação e aquecimento, utilizando-se solução digestora previamente preparada. As fibras em detergente ácido (FDA) foram determinadas com as mesmas amostras utilizadas anteriormente com 01h10min h e 84°C, com solução digestora previamente preparada para determinação de FDA. Em ambas, após o término do tempo estipulado, foi realizada a lavagem com água quente e posterior lavagem com cetona, sendo mantidas em estufa a 105 °C (mín. 8 horas), com posterior pesagem. Os mesmos saquinhos utilizados na determinação da FDN e FDA foram utilizados para determinar a lignina que consiste na lavagem dos saquinhos com ácido sulfúrico (72%) mexendo a cada 20 minutos por 3 horas, e foi realizada a lavagem com água quente, e pesagem após estufa a 105 °C (mínimo 8 horas, ideal 12 horas). As cinzas foram determinadas para ajustar os valores de FDN, FDA e Lignina (LDA), cujas amostras foram secas em mufla a 550 °C por 3 horas.

4.10 Análise Estatística

Na Fase Experimental I, as análises estatísticas foram realizadas considerando um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com 6 tratamentos e 24 repetições por tratamento. Para os dados que não apresentaram normalidade, realizou-se a transformação Box-Cox, no programa *Minitab Statistical Software* Versão 16.1.0 (MINITAB, 2010).

Após a transformação, os dados apresentaram normalidade pelo Teste de Anderson-Darling e Homocedasticidade das variâncias pelo Teste de Bartlett, pois o p-valor

encontrado foi maior do que o nível de significância de 5%, conforme apresentado no Apêndice A.

Na Fase Experimental II, os dados foram submetidos ao teste de normalidade ao nível de 5% de significância, sendo realizadas as transformações Box-Cox necessárias. Os dados apresentaram normalidade pelo Teste de Kolmogorov-Smirnov e homocedasticidade das variâncias pelo Teste de Bartlett ou Levene, pois o p-valor encontrado foi maior que o nível de significância de 5%, conforme apresentado no Apêndice B. Empregou-se o programa *Minitab Statistical Software* Versão 16.1.0 (MINITAB, 2010).

As análises estatísticas foram realizadas segundo o delineamento de parcelas subdivididas, cuja parcela principal foi o fator inóculo (com dois níveis: B e S), e a parcela secundária foi o fator carga de alimentação (com três níveis: C1, C2 e C3), quando se empregou o programa *Sisvar Software Livre* Versão 5.3 (FERREIRA, 2010). Desta forma, tem-se um delineamento estatístico de sistema de parcelas subdivididas 2x3.

Considerando as seguintes variáveis respostas: relação AV/AT, relação AI/AT, % remoção de sólidos totais, % remoção de sólidos totais voláteis, % remoção de sólidos totais fixos, % remoção de DQO_{Total}, % remoção de DQO_{solúvel}, produção de biogás, produção específica de biogás em relação ao SV, produção específica de biogás em relação ao DQO e produção de metano, os dados foram submetidos à análise de variância, ao nível de 5% de significância. Foi utilizado, quando necessário, o teste de Tukey de comparação de médias ao nível de 5% de significância.

5 RESULTADOS

5.1 Fase Experimental I

5.1.1 Potencial biometanogênico específico

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Estudos em Biogás da Embrapa Suínos e Aves, Concórdia-SC. Os testes foram realizados em triplicatas conforme recomendações da norma VDI 4630 (2006) e em batelada. Foram utilizados, aproximadamente, 3 gramas de amostra de cama de aviário em cada ensaio. As medidas de produção de biogás foram efetuadas em tubos eudiômetros graduados, e corrigidas para as condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

A celulose microcristalina de alta pureza foi utilizada como controle. Como inóculo, foi utilizado um material aclimatado, preparado a partir de partes iguais de lodo anaeróbico de reator UASB alimentado com dejetos de suínos, lodo anaeróbico de reator UASB de indústria de alimentos e esterco bovino.

Na Figura 9, é possível observar o controle utilizado de celulose microcristalina de alta pureza e, segundo a norma, seu valor de referência encontra-se entre 740 a 750 mL.gSV⁻¹. No entanto, a obtenção em torno de 80% deste valor sinaliza o andamento satisfatório do teste, o que foi observado nesse ensaio, no qual foram obtidos cerca de 97,2% de recuperação de celulose microcristalina.

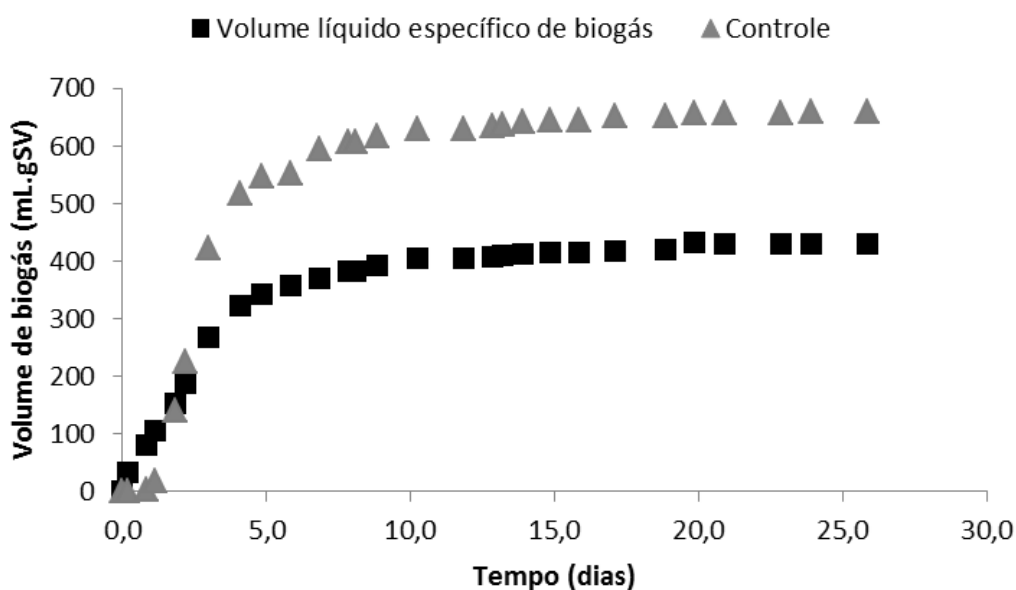


Figura 9 Gráfico de volume líquido específico de biogás da amostra de cama de aviário e do controle de celulose microcristalina

O valor do pH variou entre 7,66 do início e 7,68 após a finalização, e a relação IA/AP, medida após o fim do teste, resultou em 0,14 ($\text{g}_{\text{ác. acético}} \cdot \text{g}^{-1}_{\text{CaCO}_3}$). Esses dois parâmetros indicam que a cama de aviário foi consumida pelo processo de biodigestão anaeróbia e que não houve problemas de inibição do processo em função da produção excessiva de ácidos e nem pelo consumo da alcalinidade.

Em relação à produção de biogás, a estabilização ocorreu após o 24º dia, considerada quando a produção diária de biogás se tornou igual ou inferior a 1% do volume total produzido, com $0,50 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{gSV}^{-1}$. A concentração de metano no biogás manteve-se em 62%. Com base nesses resultados, Amaral et al. (2015) concluíram que a partir das características de biodegradabilidade, a cama de aviário pode ser utilizada como substrato para digestão anaeróbia.

O teste de análise metanogênica específica foi utilizado por Bueno (2011) como variável controle, com o intuito de obter informações antes da realização de seu estudo. Na pesquisa, monitorou-se a produção de biogás a partir de estume bovino em duas concentrações diferentes e observou-se que o biodigestor I (mais diluído) apresentou duas vezes mais atividade metanogênica quando comparado ao biodigestor II, evidenciando que a diluição do substrato tem papel fundamental na produção de biogás.

Costa et al. (2012) avaliaram a biodegradabilidade anaeróbia da cama de aviário ao utilizarem diferentes concentrações de ST adicionados 1,0; 2,5 e 5,0%. O melhor resultado em termos de produção específica de metano foi observado para a concentração de 1% de ST; com uma produção máxima de $145 \text{ L}_{\text{metano}} \text{ kg.SV}^{-1}$.

5.1.2 Teste com diferentes porcentagens de inóculo suíno

Calculou-se o coeficiente de correlação de Spearman para verificar a existência de associação entre a variável produção de biogás e as porcentagens de inóculo. O valor obtido para esse coeficiente foi igual a 0,87, que indica forte associação entre a produção de biogás e a porcentagem de inóculo. Além disso, para estudar a existência de uma relação funcional que expressa a produção de biogás em função da porcentagem de inoculo, utilizou-se a regressão, cuja representação gráfica da equação encontra-se na Figura 10.

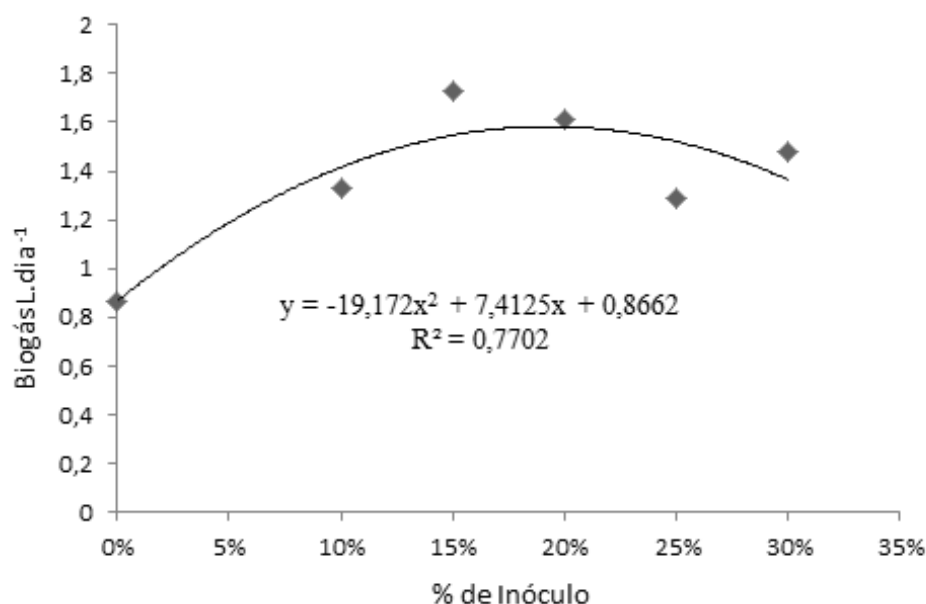


Figura 10 Relação entre as diferentes porcentagens de digestato (inóculo) testadas com as produções de biogás obtidas.

Observa-se a seguinte equação de regressão: $y = -19,172x^2 + 7,4125x + 0,8662$ enquanto o coeficiente de determinação R^2 é igual a 0,77, o qual representa que a variável dependente produção de biogás é explicada pela variável independente porcentagem de inóculo em 77%.

Segundo Banzatto e Kronka (2008), a função apresenta um ponto máximo e mínimo, os quais podem ser determinados pela derivada primeira, em que o ponto máximo é aquele que anula a derivada primeira da função. Logo, o ponto máximo da função ocorreu com 19,3 % de inóculo, com produção máxima foi de 1,59 $L_{\text{biogás}} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Por fim, os dados da produção de biogás foram submetidos à análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 Análise de Variância com 5% de significância para a produção de biogás.

Fonte de variação	Graus liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Tratamentos	5	11,0289	2,2058	26,79	0,000*
Erro	138	11,3630	0,0823		
Total	143	22,3919			

*significativo ao nível de 5% de significância.

Observa-se que o fator tratamento foi significativo, pois o p-valor é menor que o nível de significância de 5%. Em função disto, foi realizado o teste de Tukey para comparação da produção de biogás média entre os tratamentos ao nível de 5% de significância.

Tabela 8 Teste Tukey para médias de produção de biogás ao nível de 5% de significância.

Inóculo	L Biogás dia ⁻¹	Teste Tukey
T ₁ - 0%	0,8637	D
T ₂ - 10%	1,3276	C
T ₃ - 15%	1,7254	A
T ₄ - 20%	1,6124	AB
T ₅ - 25%	1,2916	C
T ₆ - 30%	1,4754	BC

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Pode-se observar na Tabela 8 que o T₃ (15% de inóculo) apresentou a melhor média de produção de biogás, e foi estatisticamente igual ao T₄ (20 % de inóculo) ao nível de 5% de significância. Tal porcentagem foi muito próxima do ponto máximo determinado pela equação de regressão (19,3%). Além disso, o T₄ (20 % de inóculo) é estatisticamente igual ao T₆ (30% de inóculo).

Xavier & Lucas Júnior (2010) utilizaram biodigestores em batelada de 60 L, com substratos contendo dejetos de vacas leiteiras, água e quatro adições de inóculo (0; 20; 30 e 40% v/v) e observaram que houve diferença significativa entre os tratamentos ($P < 0,05$). As maiores produções foram alcançadas pelo tratamento com 40% de inóculo, com média de 2,86 m³ de biogás no decorrer dos períodos de 150 dias, e não diferiram dos tratamentos com 20 e 30%. Todavia, o tratamento sem adição de inóculo apresentou a menor média de produção de biogás (1,56 m³ em 150 dias).

Além disso, o T₁ (sem adição de inóculo) apresentou a menor média de produção de biogás, diferindo estatisticamente dos demais tratamentos. Assim, a adição de digestato como inóculo apresentou resultados satisfatórios em relação à produção de biogás. Esse fato corrobora com Xavier et al. (2010), os quais afirmaram que vários métodos têm sido empregados com o objetivo de aumentar a produção de biogás, e um desses é a adição de inóculo. Portanto, esse resultado fica evidenciado ao se observar a Figura 11. Logo, recomenda-se a utilização de digestato como inóculo no processo pois, independente da porcentagem utilizada, houve melhorias em relação à produção de biogás, quando comparados ao tratamento sem a utilização de inóculo.

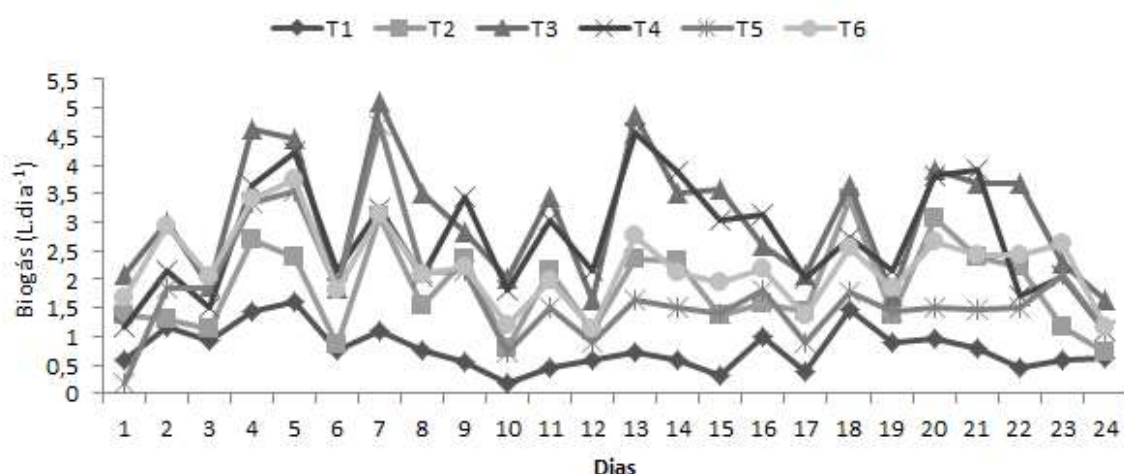


Figura 11. Produção de biogás.

Na Figura 12 é apresentado o monitoramento do pH ao longo do experimento, e isso mostra o decréscimo do valor do pH em todos os tratamentos, indicando a possível presença de ácidos com o passar do tempo. Os valores médios encontrados foram de 6.4; 6.1; 5.9; 5.8, 5.8 e 6.3, respectivamente.

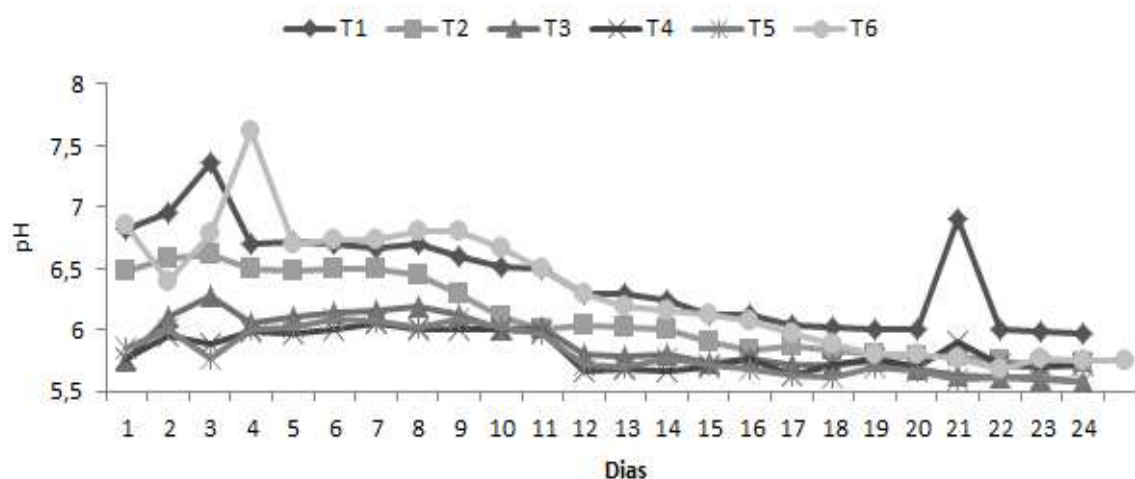


Figura 12. Monitoramento do pH

No geral, é possível observar que o T₁ (sem adição de inóculo) e o T₆ (30% de inóculo) apresentaram os valores de pH mais elevados e mais próximos durante o tempo.

Assim, segundo Deublein e Steinhauser (2011), quando o valor do pH está abaixo de 6,5, ocorre a produção de ácidos orgânicos que conduz à diminuição adicional de pH e, possivelmente, à extinção da fermentação.

Segundo Chen et al. (2008), o controle de pH dentro do ótimo crescimento de microrganismos pode reduzir a toxicidade da amônia, pois o aumento no pH resultaria em aumento da toxicidade, devido à transferência para forma ionizada (NH₄⁺).

5.2 Fase Experimental II

Para a segunda fase, optou-se por comparar fontes distintas de inóculo no processo de biodigestão com cama de aviário pois, de acordo com Shah et al. (2014), a fonte de inóculo afeta a quantidade de produção de biogás e a velocidade do processo de biodigestão anaeróbia.

A estabilidade dos biodigestores foi monitorada com base nas relações AV/AT e AI/AP, os quais são considerados estáveis no décimo sexto dia (16), quando ocorreu o início da coleta de dados a partir deste dia, como apresentado no Apêndice C.

Durante a realização do ensaio foram observados os seguintes parâmetros: pH, temperatura, N-amoniaco, alcalinidade, acidez volátil, relação AV/AT, relação AI/AT, sólidos totais, sólidos totais voláteis, sólidos totais fixos, % remoção de sólidos totais, % remoção de sólidos totais voláteis, % remoção de sólidos totais fixos, DQO_{Total}, DQO_{solúvel}, % remoção de DQO_{Total}, % remoção de DQO_{solúvel}, produção de biogás, produção específica de biogás em relação aos SV, produção específica de biogás em relação à DQO, ao metano e aos macro e micronutrientes.

5.2.1 pH e Temperatura

Observam-se os valores médios de pH e temperatura (°C) na Tabela 9.

Tabela 9 Análise descritiva para pH e temperatura.

	Inóculos	Cargas	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
pH	B	C1 0,67	7,1256	0,3125	4,39	7,0425	7,1750	7,3050
		C2 1,00	7,2343	0,0991	1,37	7,1900	7,2300	7,2500
		C3 1,67	7,1923	0,1038	1,44	7,1100	7,2000	7,2500
		Total	7,1799	0,2121	2,95	7,1200	7,2000	7,2500
	S	C1 0,67	7,1021	0,2997	4,22	7,0325	7,1950	7,2975
		C2 1,00	7,0836	0,1494	2,11	7,0800	7,1200	7,1525
		C3 1,67	7,2191	0,1126	1,56	7,1300	7,2100	7,2900

Temperatura (°C)	B	Total	7,1331	0,2186	3,07	7,0850	7,1500	7,2550
		C1 0,67	20,548	1,610	7,83	20,000	21,000	21,750
		C2 1,00	16,024	2,101	13,11	15,000	16,000	17,250
		C3 1,67	25,023	1,640	6,55	24,000	25,000	26,000
	S	Total	20,566	3,973	19,32	17,000	21,000	24,000
		C1 0,67	20,548	1,610	7,83	20,000	21,000	21,750
		C2 1,00	16,024	2,101	13,11	15,000	16,000	17,250
		C3 1,67	25,023	1,640	6,55	24,000	25,000	26,000
		Total	20,566	3,973	19,32	17,000	21,000	24,000

Observa-se na Tabela 9 que as maiores médias de pH ocorreram nas cargas de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente. No geral, os biodigestores se mantiveram estáveis em relação ao pH para todos os tratamentos aplicados e próximos à neutralidade, como mostra a Figura 13.

Segundo Chernicharo (1997), as Arqueas metanogênica, formadoras de metano, têm ótimo crescimento na faixa de pH entre 6,6 e 7,4. Cremonez et al. (2013) assumem que os valores de pH próximos à neutralidade são os mais indicados para a digestão.

A temperatura considerada foi a ambiente e apresentou valores médios abaixo de 20°C para a carga de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, em função das interferências climáticas durante a condução do experimento. No entanto, a partir dos valores de média e desvio-padrão, observa-se que a variação para tal carga foi de 2,1°C e, segundo relatado por Dublen e Steinhauer (2011), as Arqueas metanogênicas são sensíveis às mudanças rápidas de temperatura. Assim, o ideal é que a temperatura não varie, bruscamente, mais de dois graus.

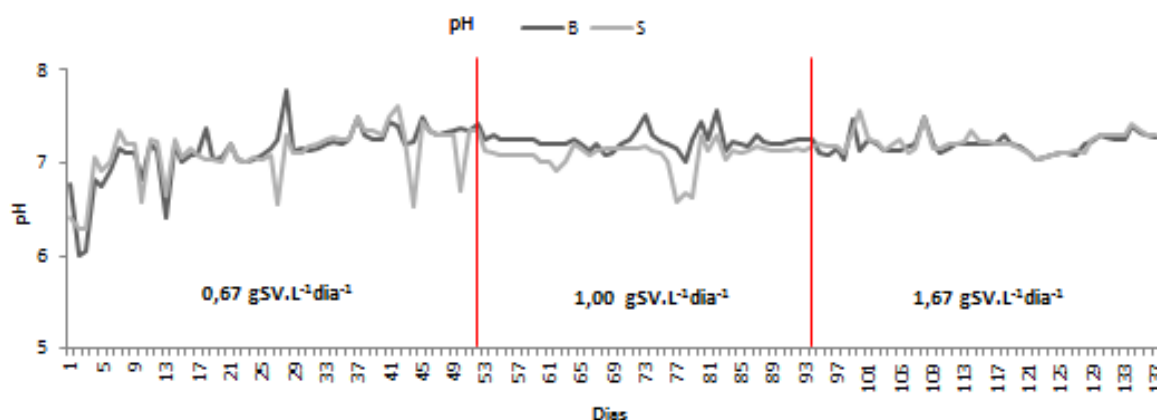


Figura 13 Monitoramento do pH para inóculo bovino (B) e suíno (S).

5.2.2. N-amoniacoal

Na Tabela 10, observam-se os valores médios de nitrogênio amoniacoal, expressos em mg.L^{-1} .

Tabela 10 Análise descritiva do N-amoniacoal

	Inóculo	Cargas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
N- Amoniacoal (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	249,76	13,55	5,43	240,38	243,60	265,30
		C2 1,00	244,53	9,46	3,87	237,86	240,38	255,36
		C3 1,67	262,41	2,17	0,83	260,82	261,52	264,88
		Total	252,23	11,52	4,57	240,38	255,36	263,20
	S	C1 0,67	199,70	30,6	15,34	164,80	212,50	221,90
		C2 1,00	221,62	13,40	6,04	212,66	215,18	237,02
		C3 1,67	280,51	15,71	5,60	262,50	287,70	291,34
		Total	234,0	13,50	17,36	212,60	221,90	275,10

Segundo Chen et al. (2008), uma diminuição no pH denota indícios de instabilidade do processo devido à presença de amônia e, muitas vezes, resulta em acúmulo de ácidos graxos voláteis. Mesmo não tendo sido observadas variações em relação ao pH, a presença de N-amoniacoal foi monitorada durante o processo de biodigestão. Os maiores valores em média de N-amoniacoal são referentes à carga 1,67 $\text{gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, cujo maior valor médio foi obtido pela utilização de inóculo suíno (280,51 mg.L^{-1}), que apresentou aumento na quantidade de N- amoniacoal com o aumento das cargas (Figura 14). Além disso, os dados apresentaram homogeneidade, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

Segundo Webb & Hawkes (1985), a cama de aviário provou ser um material adequado para uma investigação inicial das relações de rendimento de gás, desde que os níveis de NH_4 envolvidos estavam aparentemente abaixo dos níveis tóxicos.

Fernandez et al. (2009) encontraram concentrações de 434,5; 614,6 e 757,1 mg L^{-1} e concluíram em seu trabalho que a possível inibição por amônia, foi nula, uma vez que os valores calculados foram muito abaixo do limiar de concentração relatada em literatura.

Conforme Chen et al. (2008) teores de N-amoniacoal até 200 mg.L^{-1} são benéficos para o processo de biodigestão anaeróbia, mas, teores com resultados até 1000 mg.L^{-1} não apresentam efeitos nocivos ao processo. Desta forma, os resultados obtidos nesse trabalho, com os maiores valores em média 262,41 mg.L^{-1} e 280,51 mg.L^{-1} estão de acordo com os referidos autores e podem ser considerados sem efeito nocivos a este processo.

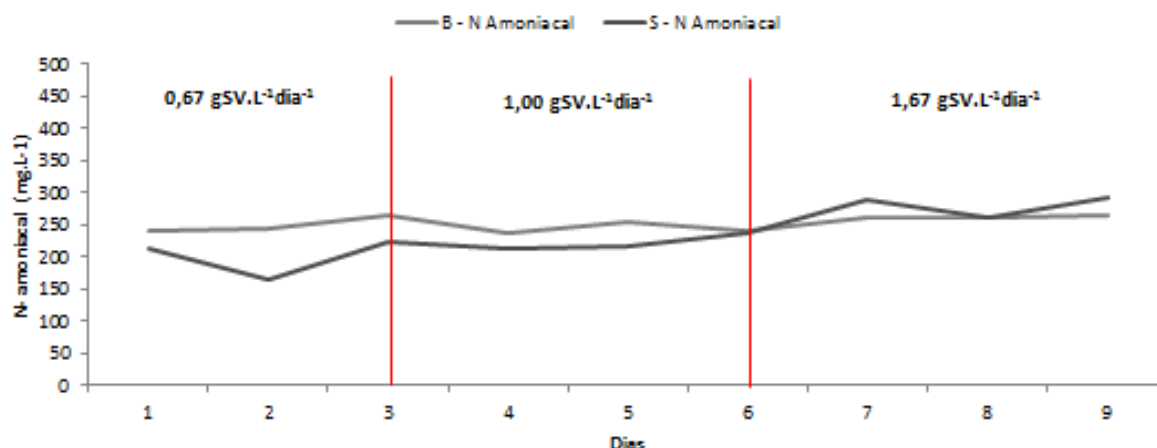


Figura 14 N-Amoniacal para inóculo bovino (B) e suíno (S).

5.2.2. Alcalinidade e Acidez Volátil

Na Tabela 11, observam-se os valores médios de alcalinidade e acidez volátil, expressos em mg $\text{CaCO}_3\text{.L}^{-1}$, mg HAc.L^{-1} , respectivamente.

Tabela 11 Análise descritiva para alcalinidade e acidez volátil

	Inóculos	Cargas	Médias	Desvio	CV (%)	Q1	Medianas	Q3
			Padrão					
Alcalinidade (mg $\text{CaCO}_3\text{.L}^{-1}$)	B	C1 0,67	2176,70	292,30	13,43	1966,50	2322,70	2397,60
		C2 1,00	1949,10	82,50	4,23	1889,50	1964,90	2017,90
		C3 1,67	1657,50	116,00	7,00	1524,90	1711,20	1748,00
		Total	1935,50	288,50	14,91	1729,60	1898,40	2154,80
	S	C1 0,67	1808,30	182,30	10,08	1736,00	1862,40	1939,20
		C2 1,00	1900,80	82,90	4,36	1833,10	1870,80	1951,90
		C3 1,67	1765,90	140,50	7,96	1645,20	1771,00	1897,50
		Total	1823,30	151,70	8,32	895,50	1850,20	1929,00
Acidez Volátil (mg HAc.L^{-1})	B	C1 0,67	525,80	129,90	24,70	452,60	502,80	565,70
		C2 1,00	231,31	26,57	15,81	201,14	232,57	251,42
		C3 1,67	283,51	29,91	10,56	264,00	276,57	314,28
		Total	1189,00	154,30	43,56	251,40	289,10	484,00
	S	C1 0,67	404,50	110,40	27,28	326,90	414,80	502,80
		C2 1,00	244,50	32,24	13,18	213,71	251,42	1414,40
		C3 1,67	280,40	51,10	18,24	257,70	276,60	314,30
		Total	314,80	101,50	32,34	251,40	276,60	355,50

As maiores médias de alcalinidade ocorreram com as cargas de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente. Além disso, os dados se apresentam homogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

Em relação aos dados de acidez volátil, observam-se em média os valores mais elevados para a carga de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. O acúmulo desses indica desbalanceamento entre a velocidade de consumo de matéria orgânica pelos microrganismos que são responsáveis pelo tratamento RIPLAY et al. (1986). Os demais valores se mantiveram próximos às demais cargas aplicadas (Figura 15). Além disso, os dados se apresentam homogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

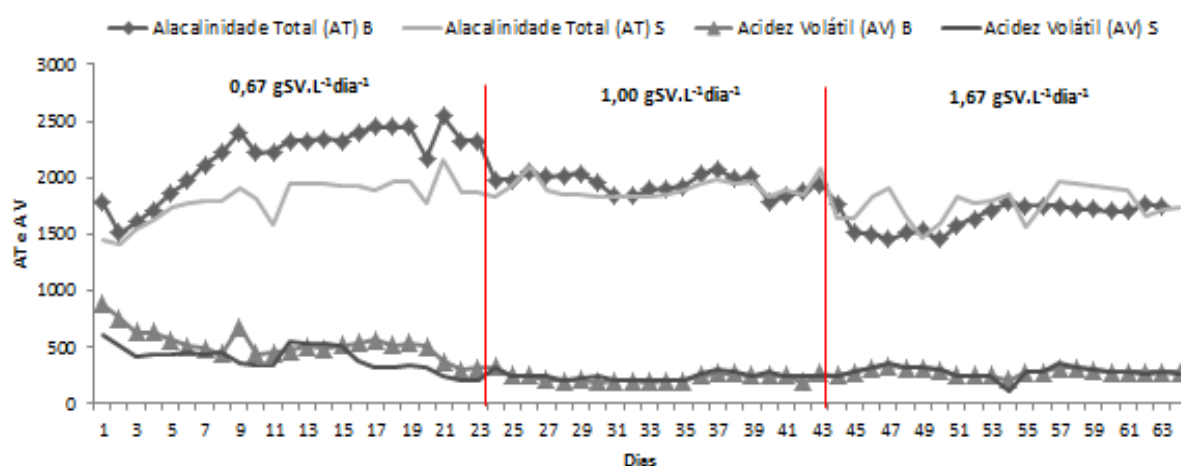


Figura 15. Monitoramento da alcalinidade e acidez volátil para os inóculos bovino (B) e suíno (S).

No geral, é possível observar na Figura 15 que a utilização dos inóculos bovino e suíno apresentaram comportamentos semelhantes em relação à acidez volátil, e os valores mais elevados para alcalinidade podem ser observados no início do processo, com a utilização de inóculo bovino ($2176,70 \text{ mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$).

Os valores observados no estudo vêm de encontro com CAVALCANTI (2009) que relata que a alcalinidade do sistema elevada acarreta o tamponamento do pH no biodigestor a fim de evitar o acúmulo de ácidos, ocasionando à queda do pH, desejável na faixa de $1500 \text{ a } 2500 \text{ mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$.

5.2.3 Relação AV/AT e Relação AI/AP

Na Tabela 12, observam-se os valores médios da relação AV/AT e AI/AP.

Tabela 12 Análise descritiva para relação AV/AT e relação AI/AP

	Inóculos	Cargas	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Medianas	Q3
AV/AT	B	C1 0,67	0,2523	0,0987	39,13	0,1997	0,2214	0,2831
		C2 1,00	0,1186	0,0179	15,14	0,1047	0,1162	0,1311
		C3 1,67	0,1865	0,0405	21,73	0,1573	0,1797	0,2172
		Total	0,1889	0,0840	44,46	0,1278	0,1622	0,2242
	S	C1 0,67	0,2286	0,0765	33,49	0,1723	0,2465	0,2716
		C2 1,00	0,1286	0,0164	12,79	0,1155	0,1274	0,1355
		C3 1,67	0,1749	0,0415	23,77	0,1530	0,1707	0,2032
		Total	0,1797	0,0662	36,82	0,1304	0,1661	0,2209
AI/AP	B	C1 0,67	0,2286	0,0765	33,49	0,1723	0,2465	0,2716
		C2 1,00	0,1286	0,0164	12,79	0,1155	0,1274	0,1355
		C3 1,67	0,2368	0,0467	19,70	0,2101	0,2333	0,2606
		Total	0,2000	0,0720	35,99	0,1313	0,1891	0,2517
	S	C1 0,67	0,4188	0,1352	32,28	0,3322	0,3756	0,4682
		C2 1,00	0,2428	0,0687	28,28	0,1612	0,2747	0,2949
		C3 1,67	0,2461	0,0515	20,93	0,2175	0,2371	0,2706
		Total	0,3071	0,1255	40,87	0,2355	0,2851	0,3489

Os maiores valores médios ocorreram para a carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, como pode ser observado na Figura 16. Além disso, os dados se apresentam homogêneos, exceto com a carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

No geral, é possível observar na Figura 16, que os valores da relação AV/AT foram similares para ambos os inóculos, com diferença apenas na primeira carga aplicada.

Segundo Drosig (2013), o valor de alcalinidade é muito difícil de generalizar, pois os limites de estabilidade têm de ser definidos especificamente para cada planta de biogás. Contudo, os limites máximos referidos na literatura para os processos estáveis podem variar de 0,3 a 0,8, cujos valores maiores do que 0,8 indicam instabilidade.

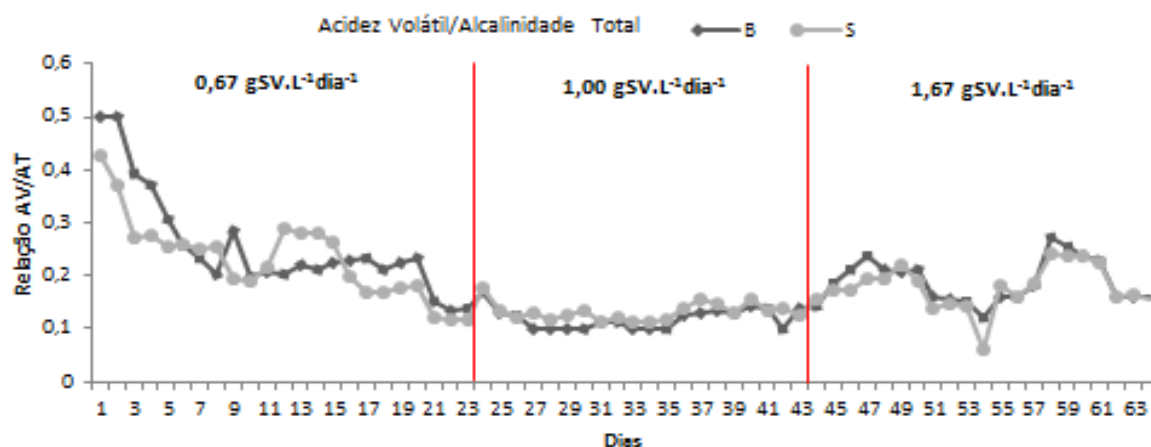


Figura 16. Relação AV/AT para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Os maiores valores médios da relação AI/AP são observados nas seguintes cargas para os inóculos de bovino e suíno: 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e a carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, respectivamente, como pode ser observado na Figura 17, ainda abaixo do valor recomendado por Riplay et al. (1986). Além disso, os dados se apresentam homogêneos, exceto a carga 0,67 g SV/L.dia, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

Segundo Riplay et al. (1986), quando os valores de AI/AP são superiores a 0,3 indicam distúrbios no processo de biodigestão e observa-se que a relação AI/AP para tal carga ultrapassa o valor de 0,3, no entanto, diminui ao longo do tempo, mantendo-se estável para as demais cargas aplicadas.

Pereira et al. (2009) afirmam que é possível ocorrer estabilidade do processo em valores diferentes de 0,3 devido às variações únicas das características de cada efluente. Contudo, observa-se na Figura 17 que a utilização do inóculo bovino tendeu a ocasionar maior estabilidade no início do processo quando comparado à utilização do inóculo suíno.

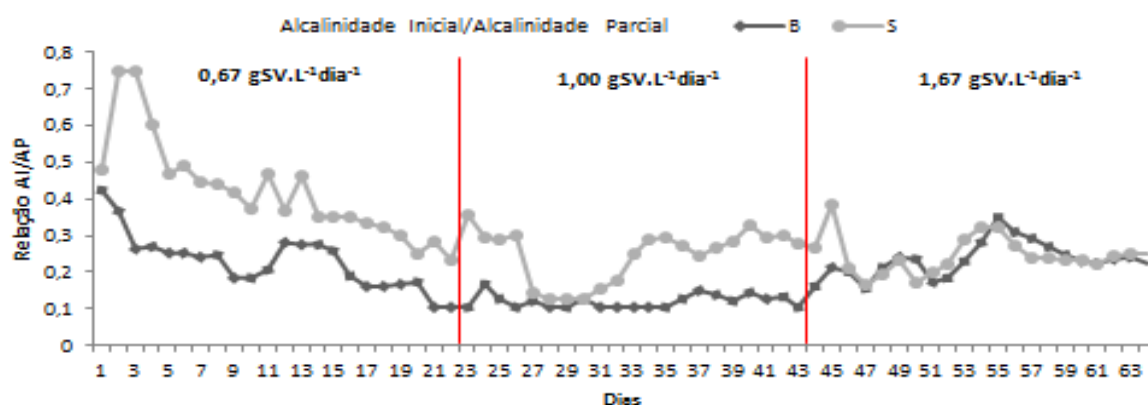


Figura 17. Relação AI/AP para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da relação AV/AT, foi realizada a análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme a Tabela 13, na qual se observa a existência de interação significativa entre os fatores. Para os dados da relação AI/AP, não foi realizada a análise de variância, pois os dados não satisfizeram a condição de homogeneidade entre as variâncias, conforme Apêndice B.

Tabela 13 Análise de variância para relação AV/AT

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	0,6684	0,6684	0,1480	0,7017
Erro 1	61	275,2835	4,5128		
Carga	2	276,3393	138,1696	153,8420	0,0000*
Interação	2	10,9366	5,4683	6,0890	0,0039*
Erro 2	61	54,7859	0,8981		
Total	127	618,0139			

*significativo ao nível de 5% de significância.

Na Tabela 14, apresenta-se o desdobramento de médias para a relação AV/AT. Foi observado que, ao se fixar o fator carga e avaliá-lo em relação aos níveis de inóculo, houve diferença significativa entre as cargas, sendo os maiores valores para as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, consideradas estatisticamente iguais para a utilização de inóculo bovino. Porém, as cargas da utilização de inóculo suíno são estatisticamente diferentes entre si, cujo valor mais elevado referente à carga foi 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹. Ao se fixar o fator inóculo, observa-se que não houve diferença estatística entre os níveis de carga em relação aos valores médios da relação AV/AT.

Tabela 14 Desdobramento de médias para a relação AV/AT em função dos inóculos e das cargas

Inóculo	AV/AT					
	C1 – 0,67		C2 – 1,00		C3 – 1,67	
Bovino	0,2523	Aa	0,1186	Ab	0,1865	Aa
Suíno	0,2286	Aa	0,1286	Ac	0,1749	Ab

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas (inóculo) e letras minúsculas nas linhas (cargas) não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Observa-se que o período de maior estabilidade ocorreu com a utilização da carga de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, sendo que a carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ apresentou as maiores médias. Contudo, os valores se encontram dentro dos níveis ótimos de operação recomendados por Silva (1997) cuja relação AV/AT mantém-se próxima a 0,50 e por Barana (2000), cuja

relação AV/AT deve ser menor que 0,3. Além disso, os resultados apresentados corroboram com Kuczman et al. (2011), os quais avaliaram a produção de biogás a partir da manipueira com o aumento das cargas orgânicas e dos volumes de alimentação. Foi realizado o acompanhamento da aclimação dos microrganismos por monitoramento dos valores da relação acidez volátil e alcalinidade total (AV/AT), observando-se que a relação se manteve em média no intervalo de 0,14 a 0,30.

5.2.4 Série de sólidos (ST, STF e STV)

Na Tabela 15, observam-se os valores médios de ST, STF e STV, expressos em mg.L^{-1} .

Tabela 15 Análise descritiva para ST, STF e STV

	Inóculos	Cargas	Médias	Desvio	CV (%)	Q1	Medianas	Q3
				Padrão				
ST (mg L^{-1})	B	C1 0,67	3,47	0,65	18,92	3,29	3,50	3,65
		C2 1,00	3,20	0,31	9,87	3,03	3,18	3,37
		C3 1,67	2,70	0,40	14,91	2,43	2,73	3,02
		Total	3,12	0,57	18,27	2,78	3,17	3,46
	S	C1 0,67	2,58	0,82	31,74	2,45	2,69	3,12
		C2 1,00	3,26	0,33	10,14	3,07	3,27	3,36
		C3 1,67	3,05	0,55	18,20	2,76	3,11	3,50
		Total	2,96	0,66	22,22	2,68	3,10	3,32
STF (mg L^{-1})	B	C1 0,67	1,17	0,25	21,35	0,98	1,17	1,32
		C2 1,00	1,91	0,21	11,28	1,78	1,96	2,07
		C3 1,67	1,67	0,23	13,61	1,50	1,72	1,84
		Total	1,58	0,38	24,23	1,30	1,65	1,86
	S	C1 0,67	1,05	0,40	37,81	0,82	1,22	1,29
		C2 1,00	1,82	0,27	15,13	1,77	1,93	2,02
		C3 1,67	1,70	0,25	14,78	1,62	1,74	1,93
		Total	1,53	0,46	30,25	1,24	1,66	1,93
STV (mg L^{-1})	B	C1 0,67	2,30	0,63	27,65	2,05	2,29	2,50
		C2 1,00	1,29	0,32	25,09	1,08	1,29	1,45
		C3 1,67	1,03	0,22	21,09	0,84	1,08	1,19
		Total	1,54	0,70	45,09	1,06	1,30	2,15
	S	C1 0,67	1,49	0,64	42,90	1,02	1,53	2,00
		C2 1,00	1,44	0,38	26,64	1,21	1,36	1,68
		C3 1,67	1,35	0,34	25,36	1,06	1,32	1,56
		Total	1,43	0,47	32,92	1,13	1,38	1,75

Na Tabela 15, observam-se os valores médios de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV), cujos maiores valores de ST e de STV referentes à carga são $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ com a utilização de inóculo bovino, como podem ser observados nas Figuras 18 e 19. Além disso, observa-se diminuição dos STV com o aumento das cargas, e o mesmo ocorre para os ST, exceto para o inóculo suíno, cujo valor maior foi para a carga de $1,00 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$.

Os dados se apresentam homogêneos, exceto para a carga de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, com inóculo suíno, pois os coeficientes de variação (CV) foram maiores que 30% em todas as frações de sólidos, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

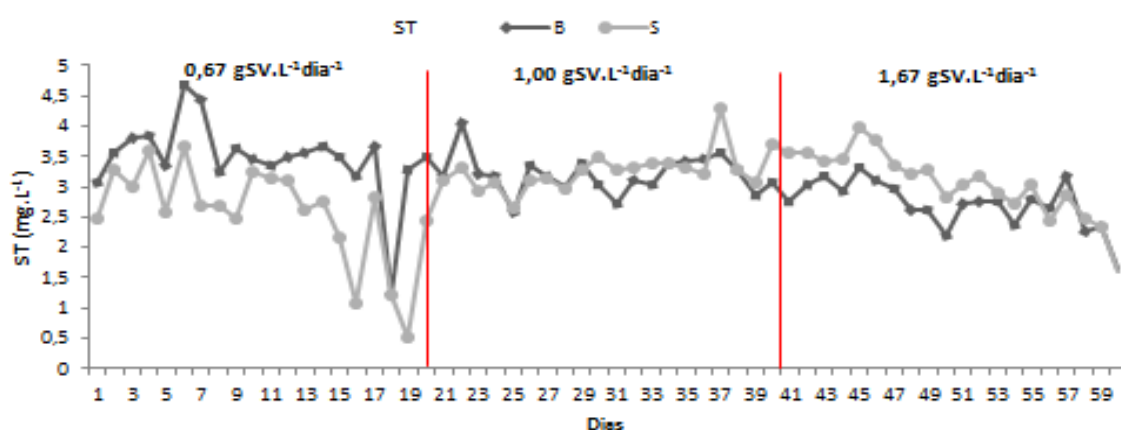


Figura 18. ST para inóculo bovino (B) e suíno (S).

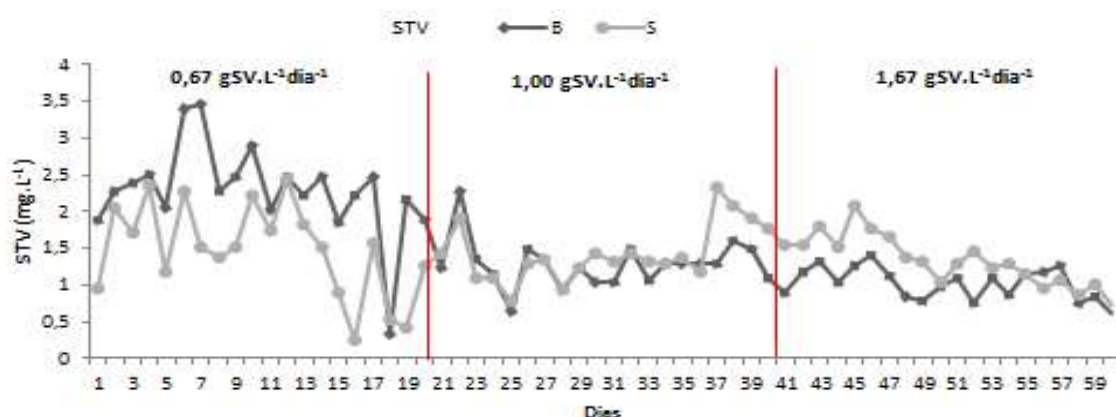


Figura 19. STV para inóculo bovino (B) e suíno (S).

No geral, observa-se nas Figuras 18 e 19 que as maiores concentrações de ST ocorrem com o inóculo suíno, principalmente nas duas últimas cargas aplicadas e que a maior concentração de STV foi para o inóculo bovino na primeira carga e tende a diminuir nas demais cargas aplicadas.

Em relação aos sólidos totais fixos (STF), é possível observar que as menores médias foram em relação à carga $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, e as demais cargas apresentaram médias próximas para os dois tipos de inóculo (Figura 20).

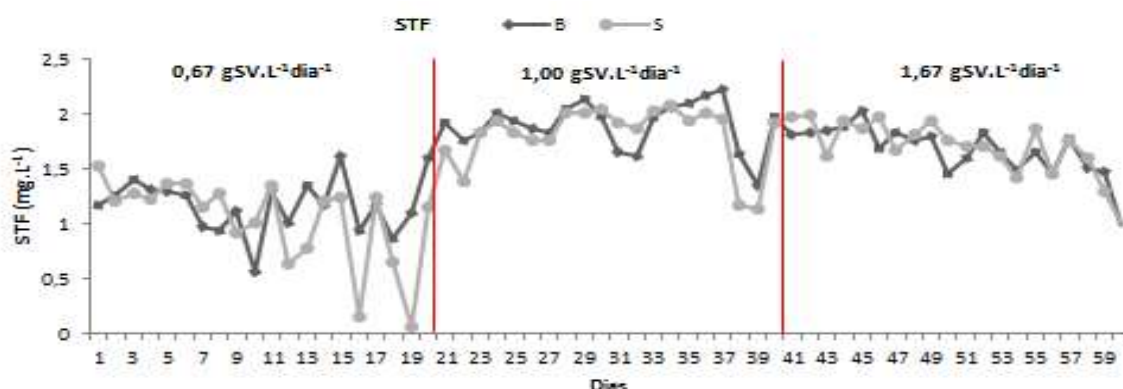


Figura 20. STF para inóculo bovino (B) e suíno (S).

5.2.5 Remoção de sólidos (ST, STF e STV).

Na Tabela 16, observam-se os valores médios de remoção de ST, STF e STV, expressos em porcentagem (%).

Tabela 16 Análise descritiva para remoção de sólidos ST, STF e STV.

		Inóculos	Cargas	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Medianas	Q3
Remoção ST (%)	B		C1 0,67	44,66	10,51	23,54	41,64	44,12	47,50
			C2 1,00	47,65	6,02	12,62	45,05	47,85	51,02
			C3 1,67	57,36	6,39	11,13	52,01	57,31	61,64
			Total	49,89	9,50	19,04	44,70	48,46	55,61
	S		C1 0,67	59,46	14,34	24,11	45,80	48,77	63,27
			C2 1,00	48,30	4,41	9,13	47,32	50,88	50,34
			C3 1,67	52,57	8,60	16,36	35,96	54,46	59,20
			Total	53,44	10,85	20,30	47,10	50,56	57,69

Remoção STF (%)	B	C1 0,67	27,30	13,04	47,77	17,17	24,74	37,28
		C2 1,00	10,81	10,18	94,19	4,76	6,96	14,92
		C3 1,67	13,82	9,06	65,56	8,23	11,30	18,10
		Total	17,31	12,92	74,62	8,19	13,51	23,39
	S	C1 0,67	34,28	25,81	75,30	17,55	21,74	53,64
		C2 1,00	15,47	12,29	79,46	6,70	13,41	14,92
		C3 1,67	14,35	10,48	72,99	6,72	12,14	20,15
		Total	21,37	19,58	91,65	9,65	13,81	25,61
Remoção STV (%)	B	C1 0,67	50,45	13,25	26,26	46,79	51,09	55,19
		C2 1,00	65,07	10,07	15,47	61,92	66,87	69,30
		C3 1,67	78,21	5,38	6,88	73,99	77,13	82,79
		Total	64,58	15,14	23,44	52,95	67,28	76,23
	S	C1 0,67	67,85	13,64	20,10	57,19	67,21	78,19
		C2 1,00	63,82	9,53	14,93	57,64	66,37	70,26
		C3 1,67	71,71	8,54	11,90	65,99	72,25	78,73
		Total	67,80	11,10	16,37	61,18	67,38	73,97

Os maiores valores médios da (%) percentagem de remoção de ST são referentes à carga $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ com a utilização de inóculo suíno (59,46%), como pode ser observado na Figura 21. Além disso, com a utilização de inóculo bovino, observa-se aumento na remoção de ST em relação ao aumento das cargas, cujo maior valor de remoção para a carga foi $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ (57,36%). Os dados apresentam-se homogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

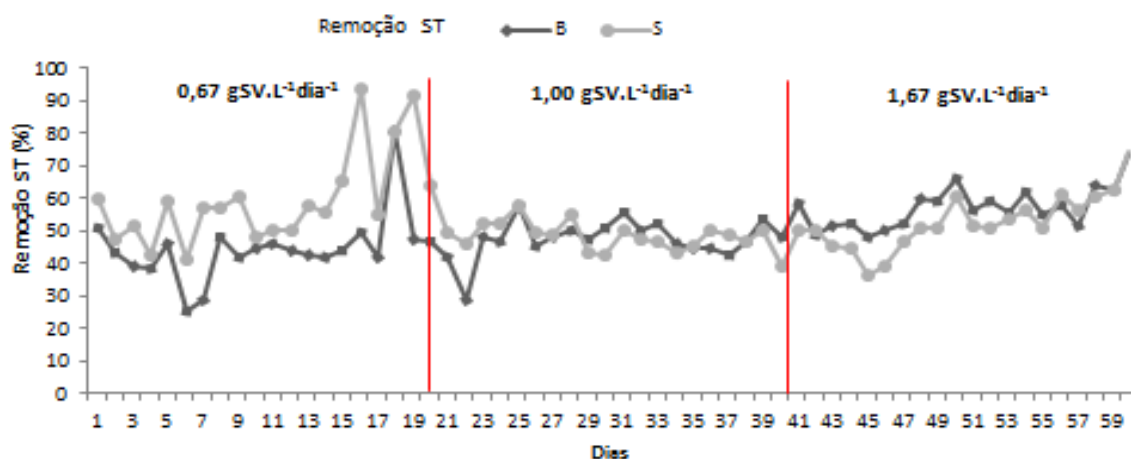


Figura 21. Percentagem (%) da Remoção de ST para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Os maiores valores de remoção de STV são referentes à carga $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ com a utilização de inóculo bovino, como pode ser observado na Figura 22. Além disso, observa-se aumento na remoção de STV em relação ao aumento das cargas, com a utilização de inóculo bovino, e o maior valor para a carga foi de $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ (78,21%). Os dados apresentam-se homogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

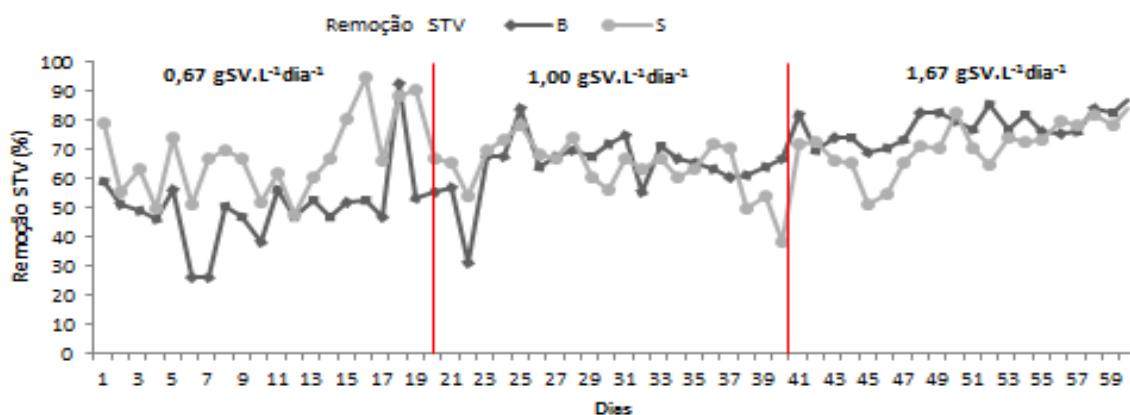


Figura 22. Percentagem (%) da Remoção de STV para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Os maiores valores de remoção de STF são referentes à carga $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, sendo a maior média de remoção obtida com a utilização de inóculo suíno (34,28%). Além disso, os dados se apresentam heterogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

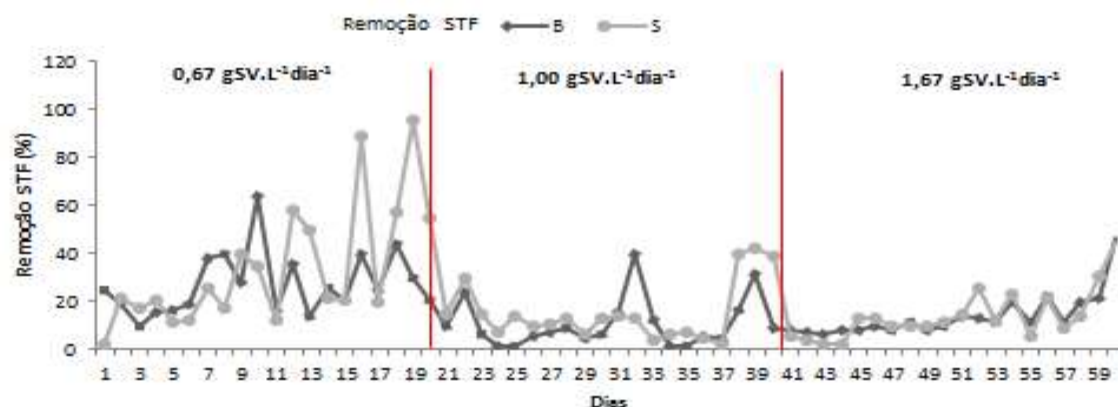


Figura 23. Percentagem (%) da Remoção de STF para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da percentagem (%) de remoção de ST, foi realizada a análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme a Tabela 17. Foi observada a existência de interação significativa entre os fatores, tornando-se necessária a realização do desdobramento da análise de variância em função dos fatores.

Tabela 17 Análise de variância para remoção de ST

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculos	1	0,001038	0,001038	3,5600	0,0643
Erro 1	57	0,016619	0,000292		
Carga	2	0,002395	0,001198	13,7260	0,0000*
Interação	2	0,005192	0,002596	29,7560	0,0000*
Erro 2	57	0,004973	0,000087		
Total	119	0,030218			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O desdobramento de médias para a remoção de ST está apresentado na Tabela 18. Foi observado que, ao se fixar o fator carga e avaliá-lo em relação aos níveis do inóculo, houve diferença significativa entre as cargas. A remoção de ST para o inóculo bovino apresentou resultados estatisticamente iguais para as cargas de 0,67 e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, e maior remoção na carga 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (57,36%). Em relação ao inóculo suíno, as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ são estatisticamente iguais, assim como 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, contudo, 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ diferem entre si ao nível de 5% de significância, todavia, a maior remoção foi obtida na carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (59,46%).

Ao se fixar o fator inóculo e avaliá-lo em relação aos níveis de carga, observa-se que houve diferença estatística entre os inóculos apenas na carga a 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, e a maior (%) percentagem de remoção de ST foi para o inóculo suíno (59,46%). Os resultados estão próximos ao relatado por Alcântara (2012), que avaliou o desempenho da biodigestão com cama de aviário e obteve médias de remoção de sólidos totais (ST) de 64,37 %.

Costa et al. (2011) testaram em seu trabalho duas misturas de cama de frango e digestatos suíno em diferentes concentrações de ST cama + digestato com 3 % sólidos; e cama + digestato com 6 % de sólidos e concluíram que a mistura que contém menor teor de sólidos não interferiu na produção de biogás nos biodigestores modelo batelada.

Tabela 18 Teste Tukey para as médias de remoção de ST ao nível de 5% de significância

Inóculo	Remoção ST (%)					
	C1 – 0,67		C2 – 1,00		C3 – 1,67	
Bovino	44,66	Aa	47,65	Ba	57,36	Bb
Suíno	59,46	Bb	48,30	Bba	52,57	Ba

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas (inóculo) e letras minúsculas nas linhas (cargas) não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

A análise de variância foi realizada ao nível de 5% de significância para os dados da remoção de STF conforme a Tabela 19, sendo apenas o fator carga significativo ao nível de 5% de significância.

Tabela 19 Análise de variância para remoção de STF

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	0,630317	0,630317	0,7230	0,3771
Erro 1	57	45,339543	0,795431		
Carga	2	21,744142	10,872071	40,7430	0,0000*
Interação	2	1,642271	0,821135	3,0770	0,0538
Erro 2	57	15,210291	0,266847		
Total	119	84,566563			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para a remoção de STF em função do fator cargas é apresentado na Tabela 20. A maior remoção de STF foi registrada na carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, sendo as cargas 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância.

Tabela 20 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável remoção de STF

Cargas	Remoção de STF (%)
C1 – 0,67	30,79 A
C2 – 1,00	13,14 B
C3 – 1,67	14,09 B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

A análise de variância foi realizada ao nível de 5% de significância para os dados da percentagem (%) de remoção de STV, conforme a Tabela 21. Observou-se também a existência de interação significativa entre os fatores, portanto, tornou-se necessária a realização do desdobramento da análise de variância em função dos fatores.

Tabela 21 Análise de variância para remoção de STV

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	1,8596x10 ¹⁰	1,8596x10 ¹⁰	0,6280	0,4313
Erro 1	57	1,6875x10 ¹²	2,9606x10 ¹⁰		
Carga	2	7,5041x10 ¹¹	3,7520x10 ¹¹	36,4740	0,0000*
Interação	2	4,690x10 ¹¹	2,3045x10 ¹¹	22,4002	0,0000*
Erro 2	57	5,8635x10 ¹¹	1,0287x10 ¹⁰		
Total	119	3,5038x10 ¹²			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O desdobramento de médias para remoção de STV está apresentado na Tabela 22. Ao se fixar o fator carga e avaliá-lo em relação aos níveis da inóculo, houve diferença significativa, cuja remoção mais elevada na carga foi 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (61,11%). Em relação ao inóculo suíno, as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ dia são estatisticamente iguais, assim como 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, contudo, 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ diferem entre si ao nível de 5% de significância. A maior percentagem (%) de remoção de STV ocorreu para a carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (64,87%).

Ao se fixar o fator inóculo e avaliá-lo em relação aos níveis de carga, ocorreu diferença estatística entre os inóculos apenas para as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, sendo que, a maior remoção de STV ocorreu para o inóculo suíno na carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (64,87%) e para o inóculo bovino em 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (55,47%).

Tabela 22 Teste de Tukey para médias de remoção de STV ao nível de 5% de significância

Inóculos	Remoção STV (%)					
	C1 – 0,67		C2 – 1,00		C3 – 1,67	
Bovino	41,06	Bc	61,11	Bb	55,47	Aa
Suíno	64,87	Aba	57,48	Bb	49,62	Ba

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas (inóculo) e letras minúsculas nas linhas (cargas) não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Desta forma, os resultados obtidos nesse trabalho corroboram com os apresentados por Orrico Júnior et al. (2010) que avaliaram a viabilidade técnica de se utilizar a biodigestão anaeróbia no tratamento dos resíduos de cama de frangos e de carcaças de aves pré-

compostadas, em substituição à segunda fase da compostagem e obtiveram reduções acentuadas nos teores de SV, em média 44,05%. Isso representa a eficiência da biodigestão anaeróbia na degradação de compostos resistentes, como a cama de frangos, visto que o material é de difícil degradação.

A cama de aviário utilizada como substrato do processo de biodigestão havia sido reutilizada por nove lotes. Tal fato pode estar relacionado com a redução de sólidos totais voláteis pois, de acordo com Santos (2001), a reutilização das camas no segundo lote permitiu maior redução de sólidos voláteis (77,93%), que as camas do primeiro lote (48, 59%).

Os resultados obtidos quanto à remoção são próximos aos relatados por Alcântara (2008), que avaliou a estabilidade do processo de biodigestão anaeróbica com cama de aviário quando utilizou carga de $1,85 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e obteve médias de remoção de sólidos voláteis (SV) de 63,33%.

5.2.6 DQO_{Total} e DQO_{Solúvel}

Na Tabela 23, observam-se os valores médios de DQO_{Total} e DQO_{Solúvel}, expresso em mg.L^{-1} .

Tabela 23 Análise descritiva para DQO_{Total} e DQO_{Solúvel}

	Inóculo	Cargas	Média	Desvio	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
			Padrão					
DQO Total (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	1931,0	468,0	24,25	1766,0	1810,0	2282,0
		C2 1,00	1209,6	356,3	29,45	848,3	1117,6	1616,8
		C3 1,67	1269,1	379,6	29,91	967,1	1097,9	1605,9
		Total	1466,7	515,1	35,12	999,0	1513,5	1784,5
	S	C1 0,67	1150,9	361,1	31,37	856,3	1055,9	1436,2
		C2 1,00	1323,0	451,0	34,13	823,0	1354,0	1717,0
		C3 1,67	1436,0	523,0	36,46	1032,0	1298,0	1825,0
		Total	1305,3	459,5	35,21	895,5	1199,1	1611,7
DQO Solúvel (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	1603,0	538,0	33,57	1190,0	1827,0	2034,0
		C2 1,00	1022,8	334,7	32,72	763,1	1099,8	1300,7
		C3 1,67	952,9	250,5	26,29	967,1	941,5	1155,1
		Total	1189,0	483,8	40,69	804,9	1114,7	2176,2
	S	C1 0,67	1305,0	351,1	26,90	1171,4	1426,8	1503,3
		C2 1,00	1235,0	228,5	18,50	1009,3	1271,6	1414,4
		C3 1,67	1269,5	272,0	21,42	1049,3	1287,9	1486,1
		Total	1269,8	284,7	22,42	1099,6	1332,8	1490,4

Na Tabela 23, observa-se que os maiores valores médios de DQO_{Total} ocorreram para as cargas de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ com a utilização de inóculos bovino e suíno, respectivamente, como mostra a Figura 24.

Os dados se apresentam homogêneos para as cargas com uso de inóculo bovino, e heterogêneos para as cargas com uso de inóculo suíno, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

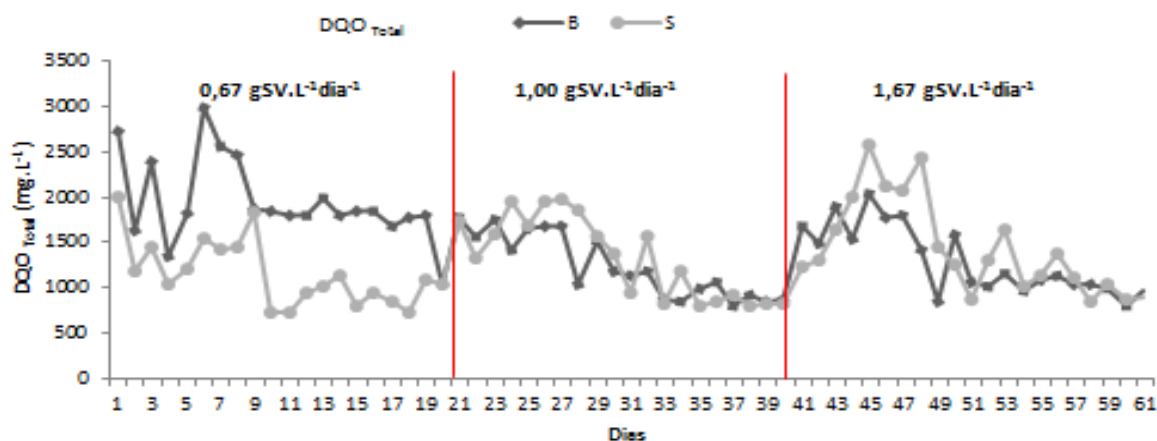


Figura 24. DQO_{Total} para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Os maiores valores médios da $DQO_{Solúvel}$ ocorreram para carga de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, e foram superiores com a utilização de inóculo suíno nas duas últimas cargas, como pode ser observado na Figura 25. Os dados se apresentam homogêneos, exceto para as cargas $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e $1,00 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ com o uso de inóculo bovino, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

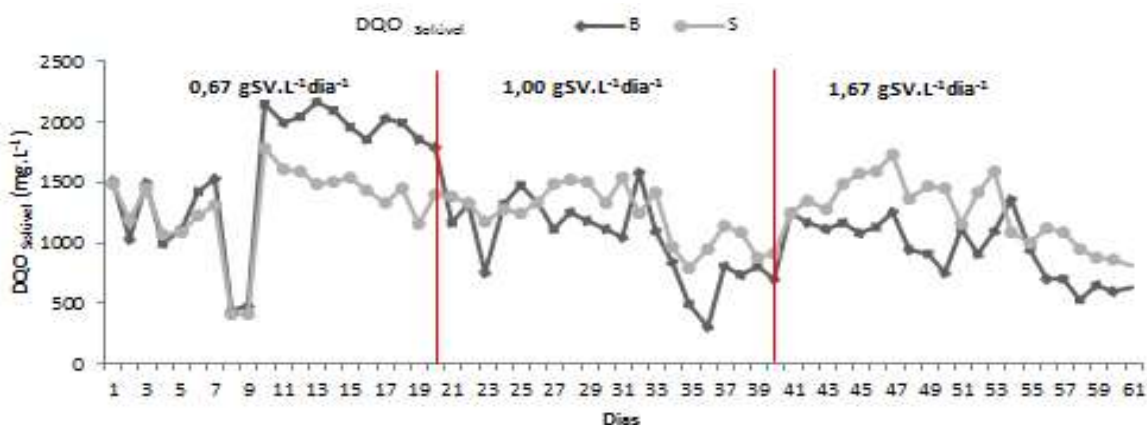


Figura 25. $DQO_{Solúvel}$ para inóculo bovino (B) e suíno (S).

5.2.7 Remoção DQO_{Total} e DQO_{Solúvel}

Na Tabela 24, observam-se os valores médios de remoção de DQO_{Total} e de DQO_{Solúvel}, expressos em porcentagem (%).

Tabela 24 Análise descritiva para remoção de DQO_{Total} e DQO_{Solúvel}

	Inóculos	Cargas	Médias	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
Remoção DQO Total (%)	B	C1 0,67	41,06	14,30	34,82	30,34	44,76	46,11
		C2 1,00	61,11	11,45	18,74	48,02	64,07	72,73
		C3 1,67	55,47	13,32	24,01	43,65	61,48	66,07
		Total	52,6	15,39	29,26	44,56	50,48	66,07
	S	C1 0,67	64,87	11,02	16,99	56,17	67,78	73,86
		C2 1,00	57,48	14,51	25,25	44,81	46,46	63,77
		C3 1,67	49,62	18,37	37,01	35,96	54,46	60,73
		Total	57,20	16,04	28,05	47,35	60,13	70,01
Remoção DQO Solúvel (%)	B	C1 0,67	37,23	21,07	56,59	20,38	28,48	53,43
		C2 1,00	61,31	12,66	20,65	50,80	58,4	71,13
		C3 1,67	46,32	14,11	30,47	34,93	46,96	60,73
		Total	48,26	18,88	39,12	33,85	48,91	60,95
	S	C1 0,67	48,91	13,75	28,10	41,15	44,14	54,14
		C2 1,00	53,29	8,64	16,22	46,50	51,90	61,82
		C3 1,67	28,48	15,32	53,79	16,28	27,45	40,89
		Total	43,31	16,8	38,79	36,51	43,47	52,84

Na Tabela 24, observa-se que os maiores valores médios de remoção DQO_{Total} são referentes às cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ com a utilização de inóculos suíno e bovino, respectivamente, como mostra a Figura 26.

Os dados apresentam-se homogêneos, exceto para as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

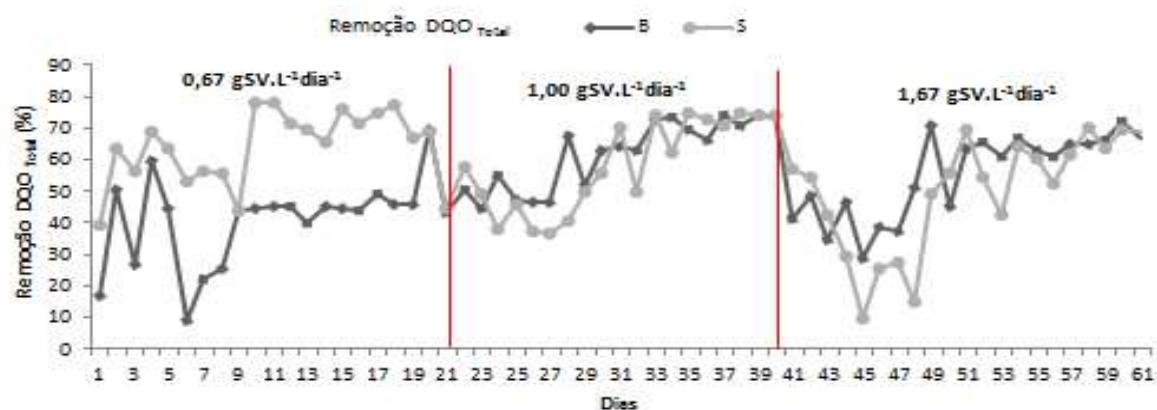


Figura 26. Percentagem (%) de Remoção de DQO_{Total} para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Na Tabela 24, os maiores valores médios de remoção DQO_{Solúvel} são referentes à carga 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, como pode ser observado na Figura 27. Os dados apresentam-se homogêneos, exceto para as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

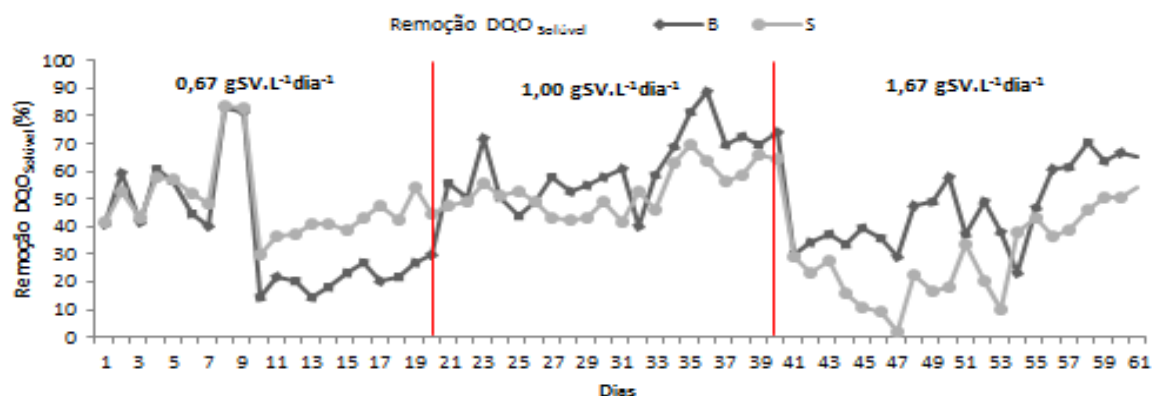


Figura 27. Percentagem (%) de Remoção de DQO_{Solúvel} para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da remoção de DQO_{Total}, não foi realizada a análise de variância, pois os dados não apresentaram normalidade, conforme apresentado no Apêndice C. Os dados da remoção de DQO_{Solúvel} foram submetidos à análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme Tabela 25. Pode-se observar a existência de interação significativa entre os fatores, tornando-se necessária a realização do desdobramento da análise de variância em função dos fatores.

Tabela 25 Análise de variância para remoção de DQO_{Solúvel}

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	905,06	905,06	2,00	0,1623
Erro 1	58	26206,86	451,84		
Carga	2	103111,77	5155,88	70,24	0,0000*
Interação	2	5511,41	2755,70	37,54	0,0000*
Erro 2	58	4256,92	73,39		
Total	121	47192,03			

*significativo ao nível de 5% de significância.

Os desdobramentos de médias para DQO_{Solúvel} em função do inóculo e das cargas estão apresentados na Tabela 26. É possível observar que, ao se fixar o fator carga e avaliá-lo em relação aos níveis do inóculo, ocorreram diferenças significativas entre as cargas para a utilização de inóculo bovino, cuja remoção mais elevada na carga foi de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (61,31%). Em relação ao inóculo suíno, houve diferença significativa entre as cargas, e a remoção mais elevada na carga foi de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (53,29%), a qual se apresentou estatisticamente igual ao nível de 5% de significância à carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (48,91%).

Ao se fixar o fator inóculo e avaliá-lo em relação aos níveis de carga, observa-se que houve diferença estatística entre os inóculos apenas para as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹. Porém, a maior remoção DQO_{Solúvel} foi para o inóculo suíno na carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (48,91%) e para o inóculo bovino na carga 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (46,32%).

Tabela 26 Teste Tukey para as médias de remoção de DQO_{Solúvel} ao nível de 5% de significância

Inóculo	% remocao DQO _s					
	C1 – 0,67		C2 – 1,00		C3 – 1,67	
Bovino	37,23	Bb	61,31	Ba	46,32	Ab
Suíno	48,91	Ab	53,29	Bb	28,48	Ba

Medias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas (inóculo) e letras minúsculas nas linhas (cargas) não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Os dados apresentados estão de acordo com Bueno (2010), que realizou um estudo comparativo entre dois biodigestores com estrume bovino e água nas proporções de 1:2 (biodigestor I) e 1:1 (biodigestor II). Foi possível observar que as seguintes porcentagens de remoção de DQO 51,0% para o biodigestor I (mais diluído) e 26,9% para o biodigestor II.

Segundo Alcantara (2012), a maior média de remoção de DQO foi de 85,89%, considerando 3,32 % de SV na alimentação e TRH de 11,6 dias. Araújo (2015) avaliou em

seu estudo o comportamento do biodigestor anaeróbio alimentado com água residuária de fecularia, de acordo com a variação da carga orgânica volumétrica e concluiu que não houve diferença estatística entre as médias de remoção de DQO_{Total} nas cargas 2,5 e 5,0 $g.L^{-1}.d^{-1}$ e nas cargas 8,0 e 10,0 $g.L^{-1}.d^{-1}$. E, para a remoção de $DQO_{Solúvel}$, as médias das cargas 2,5, 5,0 e 8,0 $g.L^{-1}.d^{-1}$ foram estatisticamente iguais, assim como as médias das cargas 5,0, 8,0 e 10,0 $g.L^{-1}.d^{-1}$. Araújo (2015) considerou como elevados os valores de (%) percentagem de remoção de DQO_{Total} (variando de 98,42 até 99,6 %), e observou que a (%) percentagem de remoção de $DQO_{Solúvel}$ foi semelhante às da remoção de DQO_{Total} .

5.2.8 Produção de Biogás

Na Tabela 27, observam-se os valores médios de produção de biogás, expressos em $L_{biogás}.dia^{-1}$.

Tabela 27 Análise descritiva da produção de biogás em $L_{biogás}.dia^{-1}$

		Inóculos	Cargas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
Biogás ($L_{biogás}.dia^{-1}$)	B		C1 0,67	0,2311	0,0951	41,14	0,1748	0,2856	0,2954
			C2 1,00	0,5817	0,2531	43,51	0,4023	0,5613	0,7071
			C3 1,67	0,7794	0,3174	40,72	0,4727	0,7583	1,0636
			Total	0,5107	0,3288	64,28	0,2856	0,3939	0,6967
	S		C1 0,67	0,1052	0,0476	45,24	0,0675	0,1246	0,1416
			C2 1,00	0,2431	0,0852	35,03	0,1970	0,2314	0,2748
			C3 1,67	0,4751	0,3547	74,65	0,1477	0,4629	0,7681
			Total	0,2636	0,2564	97,29	0,1167	0,1674	0,3073

Na Tabela 27, os maiores valores médios de produção de biogás são referentes à carga 1,67 $gSV.L^{-1}.dia^{-1}$, e ocorreu o maior valor de produção de biogás com a utilização de inóculo bovino (0,7794 $L_{biogás}.dia^{-1}$). Além disso, é possível observar aumento da produção de biogás para ambos os inóculos, em relação ao aumento das cargas, cujos menores valores em média na carga 0,67 $gSV.L^{-1}.dia^{-1}$, como observado na Figura 28. Os dados se apresentam heterogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

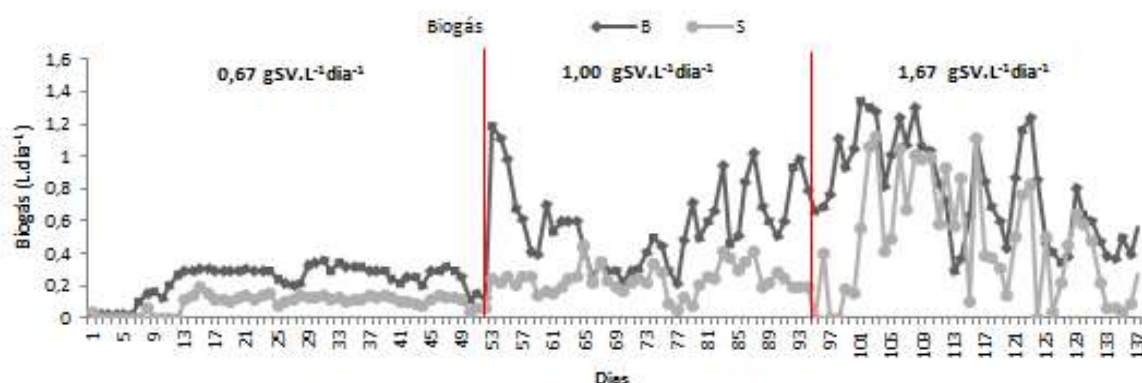


Figura 28. Produção de biogás para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da produção de biogás, foi realizada a análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme a Tabela 28. Apenas o fator carga e o fator inóculo foram significativos ao nível de 5% de significância.

Tabela 28 Análise de variância para produção de biogás

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	1,413995	1,413995	74,354	0,0000*
Erro 1	134	2,548293	0,019017		
Carga	2	2,516784	1,258392	155,311	0,0000*
Interação	2	0,026840	0,013420	1,656	0,1947
Erro 2	134	1,085724	0,008102		
Total	273	7,591636			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para produção de biogás, em função do fator inóculo, é apresentado na Tabela 29. A maior média de produção de biogás ocorreu com a utilização de inóculo bovino $0,5107 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{dia}^{-1}$, ou seja, $0,2471 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{dia}^{-1}$ a mais quando comparado com o inóculo suíno.

Tabela 29 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção de biogás

Inóculos	Biogás ($\text{L}_{\text{biogás}} \cdot \text{dia}^{-1}$)	
Bovino	0,5107	A
Suíno	0,2636	B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para produção de biogás em função do fator cargas é apresentado na Tabela 30. As cargas diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, cuja maior média de produção de biogás foi na carga 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ com 0,6272 L_{biogás}.dia⁻¹, e a menor na carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ com 0,1681 L_{biogás}.dia⁻¹.

Tabela 30 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção de biogás

Cargas	Biogás (L _{biogás} .dia ⁻¹)	
C1 – 0,67	0,1681	C
C2 – 1,00	0,4124	B
C3 – 1,67	0,6272	A

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

No geral, é possível observar que o processo de biodigestão com cama de aviário utilizando os digestatos como inóculo é viável em relação à produção de biogás, cuja utilização do inóculo bovino apresentou a maior média de produção de biogás, 0,5107 L_{biogás}.dia⁻¹. Diversos autores avaliaram a produção de biogás no processo de biodigestão anaeróbia com cama de aviário.

Aires et al. (2013) avaliaram a diluição e separação das frações sólida e líquida da cama de frangos de corte para ensaio de biodigestão anaeróbia. E observaram que os volumes de produção do tratamento com separação das frações sólidas (CSFS) e sem separação das frações sólidas (SSFS) foram de 0,45 e 0,52 m³ de biogás, respectivamente, no período de 63 dias de retenção hidráulica (TRH).

Chiabai Júnior et al. (2013) avaliaram a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, usando o substrato com os resíduos das aves, inóculo e água em proporções de ST de 2, 4, 6 e 8%. Os autores verificaram que a concentração de 8% de ST apresentou a melhor produção média de biogás ao final dos 21 dias de biodigestão. As produções de biogás para as concentrações de ST de 2%, 4%, 6% e 8% foram de 0,95 L, 9,45 L, 13,25 L e 21,03 L, respectivamente.

Silveira et al. (2014) avaliaram a produção de biogás em mini-biodigestores feitos de garrafas PET abastecidos com cama de aviário para simular o aproveitamento de dejetos provenientes da avicultura. Utilizaram três tratamentos com diferentes percentuais de água (90, 80 e 70%) e concluíram que o tratamento com 70% de água e 30% de esterco de ave apresentou melhor desempenho na produção de biogás (6353,3 mL).

Suzuki et al. (2012) avaliaram diferentes misturas entre cama de aviário e manipueira com o intuito de produzir energia limpa e renovável a fim de contribuir para a matriz energética brasileira. Apesar de concluírem que a diluição da cama de aviário em manipueira não apresentou resultados satisfatórios, observaram que, para a cama de

aviário, os biodigestores de fase simples apresentaram boa produção de biogás, e que o tratamento com 100% de cama de frango obteve sucesso na produção de biogás ($573,1 \text{ cm}^3$) além de servir de parâmetro de comparação para os demais tratamentos.

O aumento das cargas de alimentação proporcionou aumento na produção de biogás, e a carga $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ apresentou a maior média de produção de biogás. Esse resultado corrobora com Yadvika et al. (2004), os quais relatam que, em um estudo realizado na Pensilvânia, onde a carga orgânica variou de $346 \text{ kgSV.dia}^{-1}$ até $1030 \text{ kgSV.dia}^{-1}$, o rendimento da produção de gás aumentou $67\text{-}202 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. O mesmo foi relatado por Torres (2009), que observou tendência de elevação da produção de biogás em relação ao aumento de cargas de alimentação, principalmente para o biodigestor com meio suporte de bambu.

5.2.9 Produção Específica de Biogás em relação aos SV

Na Tabela 31, observam-se os valores médios de produção específica de biogás por $\text{SV}_{\text{consumidos}}$, expressos em $\text{L}_{\text{biogás}}.\text{g SV}^{-1}$.

Tabela 31 Análise descritiva para produção específica de biogás por SV

	Inóculos	Cargas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
Prod. Esp. Biogás ($\text{L}_{\text{biogás}}.\text{g SV}^{-1}$)	B	C1 0,67	0,8578	0,3101	36,15	0,6146	0,9999	1,0836
		C2 1,00	0,9810	0,3820	38,96	0,6780	1,0210	1,3390
		C3 1,67	0,5211	0,1915	36,75	0,3108	0,4859	0,6658
		Total	0,7865	0,3543	45,05	0,4816	0,7704	1,0537
	S	C1 0,67	0,3182	0,1228	38,59	0,2570	0,3207	0,3803
		C2 1,00	0,4116	0,1671	40,61	0,2849	0,4525	0,5358
		C3 1,67	0,2555	0,2387	84,95	0,3720	0,1840	0,4793
		Total	0,3284	0,1878	57,19	0,1606	0,3242	0,4715

Na Tabela 31, os maiores valores de produção específica de biogás por SV são referentes à carga $1,00 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$. Assim, o maior valor produção específica de biogás por SV foi com a utilização de inóculo bovino ($0,981 \text{ L}_{\text{biogás}}.\text{g SV}^{-1}$). Além disso, os dados se apresentam heterogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

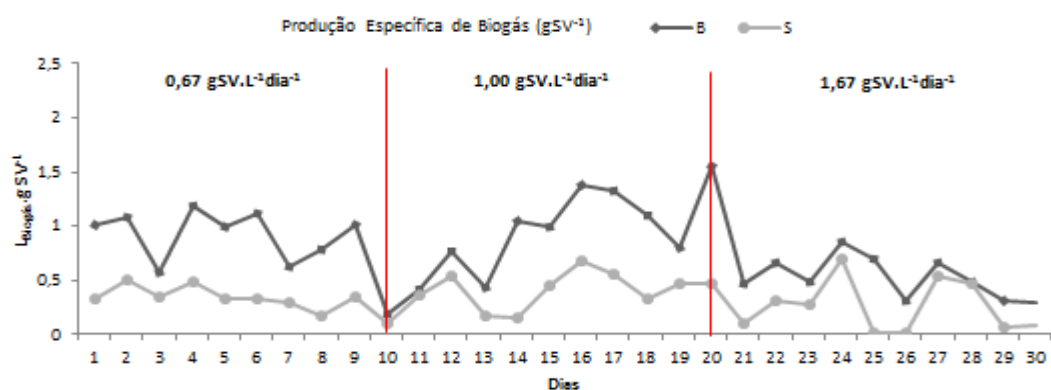


Figura 29. Produção específica de biogás por SV para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da produção específica de biogás por SV, foi realizada análise de variância, ao nível de 5% de significância. Conforme a Tabela 32, observa-se que apenas os fatores carga e inóculo foram significativos ao nível de 5% de significância.

Tabela 32 Análise de variância para produção específica de biogás por SV

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	1,546579	1,546579	30,8010	0,0000*
Erro 1	27	1,355704	0,050211		
Carga	2	0,510926	0,225463	16,7270	0,0000*
Interação	2	0,023862	0,011931	0,7810	0,4679
Erro 2	27	0,412363	0,015273		
Total	59	3,849434			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para produção específica de biogás por SV em função do fator inóculo é apresentado na Tabela 33, e a maior média de produção específica de biogás por SV ocorreu com a utilização de inóculo bovino $0,786 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{g SV}^{-1}$, ou seja, $0,458 \text{ L}_{\text{biogás}} \cdot \text{g SV}^{-1}$ a mais quando comparado com o inóculo suíno.

Tabela 33 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção específica de biogás por SV

Inóculo	Prod.Esp.($\text{L}_{\text{biogás}} \cdot \text{g SV}^{-1}$)	
Bovino	0,7865	A
Suíno	0,3284	B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para produção específica de biogás por SV em função do fator cargas é apresentado na Tabela 34, onde mostra-se que as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ são estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância, sendo a maior média para a carga 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ com 0,696 L_{biogás}.g SV⁻¹. A carga 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ difere estatisticamente das demais ao nível de 5% de significância, apresentando a menor média (0,388 L_{biogás}.g SV⁻¹).

Tabela 34 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção específica de biogás por SV

Cargas	Prod.Esp.(L _{biogás} .g SV ⁻¹)	
C1 – 0,67	0,5880	A
C2 – 1,00	0,6960	A
C3 – 1,67	0,3883	B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Observa-se que a produção específica de biogás por SV com a utilização do inóculo bovino foi aproximadamente 2,4 vezes maior quando comparada ao uso de inóculo suíno. E os maiores valores de produção são referentes às duas primeiras cargas aplicadas. Além disso, os valores de produção de biogás por SV vêm de encontro ao valor de referência obtido pelo teste de BMP para cama de aviário em estudo, ou seja, 0,5 L_{biogás}.gSV⁻¹.

Diversos autores observaram a produção de biogás em relação aos SV. Por exemplo, Bouallagui et al. (2009) obtiveram produção de biogás de 0,44 – 0,61 L_{biogás}.g SV⁻¹ utilizando carga de 2,5 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ com a utilização de efluente de abatedouro.

Fukayama et al. (2009) avaliaram a produção de biogás em camas de frango reutilizadas em diferentes épocas, e observaram que os valores de produção foram 0,401; 0,410; 0,400 e 0,520 m³_{biogás}.g SV⁻¹ para 1º; 2º; 3º e 4º lotes, respectivamente. Os autores concluíram que há aumento na produção de biogás com a reutilização da cama de frango de corte.

5.2.10 Produção Específica de Biogás em relação a DQO.

Na Tabela 35, observam-se os valores médios de produção específica de biogás por DQO_{consumida} expressos em L_{biogás}.g DQO⁻¹.

Tabela 35 Análise descritiva para produção específica de biogás por DQO

	Inóculo	Cargas	Média	Desvio	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
			Padrão					
Prod. Esp. Biogás ($L_{\text{biogás}} \cdot g \text{ DQO}^{-1}$)	B	C1 0,67	1,3246	0,2712	20,48	1,1272	1,3516	1,5301
		C2 1,00	1,2130	0,4510	37,14	0,8840	1,1980	1,3930
		C3 1,67	1,1210	0,6890	61,48	0,6680	0,8330	1,3980
		Total	1,2197	0,089	40,21	0,8387	1,1512	1,5024
	S	C1 0,67	0,3938	0,1017	25,82	0,3386	0,3913	0,4953
		C2 1,00	0,5155	0,2070	40,15	0,3792	0,5349	0,6571
		C3 1,67	0,8470	0,7200	84,95	0,3720	0,5260	1,4070
		Total	0,5856	0,085	79,25	0,3631	0,4723	0,5999

Na Tabela 35, é possível observar que os maiores valores de produção específica de biogás por DQO são referentes às cargas de $1,00 \text{ gSV} \cdot L^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $1,67 \text{ gSV} \cdot L^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ para os inóculos bovino e suíno, respectivamente. O maior valor médio de produção específica de biogás por DQO foi obtido com a utilização de inóculo bovino ($1,325 L_{\text{biogás}} \cdot g \text{ DQO}^{-1}$). Os dados se apresentam heterogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi maior que 30%, exceto a carga $0,67 \text{ gSV} \cdot L^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, onde os dados podem ser considerados homogêneos, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

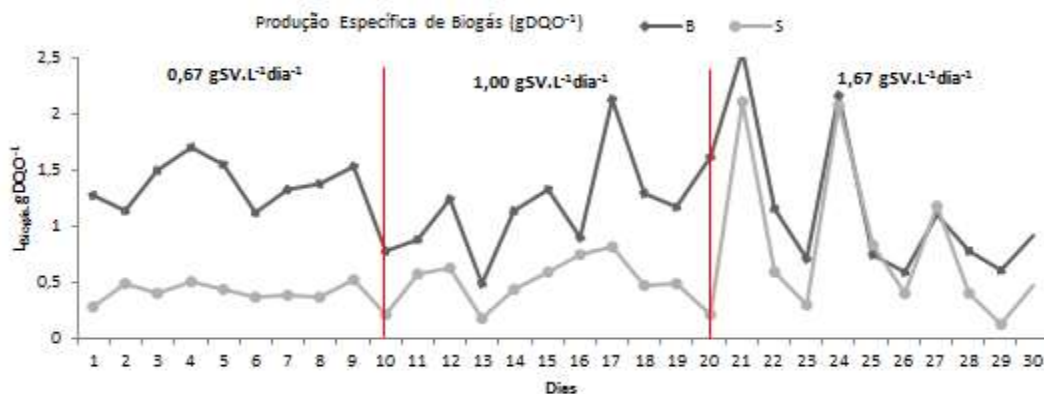


Figura 30. Produção específica de biogás por DQO para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da produção específica de biogás por DQO, foi realizada a análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme a Tabela 36, e foi observada a existência de interação significativa entre os fatores, tornando necessária a realização do desdobramento da análise de variância em função dos fatores.

Tabela 36 Análise de variância para produção específica de biogás por DQO

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	2,0618	2,0618	20,6420	0,0001*
Erro 1	27	2,6970	0,0998		
Carga	2	0,0344	0,0172	1,3080	0,2868
Interação	2	0,3351	0,1675	12,720	0,0001*
Erro 2	27	0,3556	0,0131		
Total	59	5,4841			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O desdobramento de médias para produção específica de biogás por DQO é apresentado na Tabela 37. É possível observar que ao se fixar o fator carga e avaliá-lo em relação aos níveis do inóculo, não houve diferença significativa ao nível de 5% de significância. Ao se fixar o fator inóculo e avaliá-lo em relação aos níveis de carga, observa-se que houve diferença estatística para as cargas $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e $1,00 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, sendo que, a maior média de produção específica de biogás por DQO foi com a utilização de inóculo bovino nas duas cargas, $1,325 \text{ L}_{\text{biogás}}.\text{g DQO}^{-1}$ e $1,211 \text{ L}_{\text{biogás}}.\text{g DQO}^{-1}$, respectivamente. A carga $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ não apresentou diferença significativa ao nível de 5% de significância.

Tabela 37 Teste Tukey para as médias de produção específica de biogás por DQO ao nível de 5% de significância

Inóculos	Prod.Esp.($\text{L}_{\text{biogás}}.\text{g DQO}^{-1}$)					
	C1 – 0,67		C2 – 1,00		C3 – 1,67	
Bovino	1,3246	Aa	1,213	Aa	1,121	Ba
Suíno	0,3938	Ba	0,5155	Ba	0,847	Ba

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas colunas (inóculo) e letras minúsculas nas linhas (cargas) não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Observa-se que a produção específica de biogás por DQO com a utilização do inóculo bovino foi superior quando comparada à produção de biogás do suíno, sendo a maior média de produção obtida para a primeira carga aplicada. Esse resultado está de acordo com o apresentado por Tessaro et al. (2015) que concluíram que o melhor tratamento foi aquele em que se utilizou cama de aviário associada ao digestato bovino, seguido do tratamento com cama de aviário associada ao digestato bovino mais água. Os menores resultados foram observados no terceiro tratamento, cuja mistura foi cama de aviário e água.

É importante ressaltar que, a utilização de inóculo bovino pode ser considerada mais viável para a produção de biogás, não apenas por produzir maiores quantidades em comparação ao inóculo suíno, mas também por ter apresentado uma produção mais rápida desde o início da primeira carga aplicada. O contrário é observado com a utilização do inóculo suíno, ou seja, observa-se que, como os menores valores foram registrados nas primeiras cargas aplicadas, tal fato pode estar relacionado com a primeira etapa do processo de biodigestão. A fase de hidrólise foi aquela em que o inóculo suíno degradou de forma mais lenta os elevados teores de celulose presente na cama de aviário, demonstrando a eficiência do inóculo bovino na degradação deste tipo de substrato.

5.2.11 Produção de Metano

Na Tabela 38, mostram-se os valores médios de produção de metano, expressos em $L_{\text{metano}} \cdot \text{dia}^{-1}$.

Tabela 38 Análise descritiva para produção de metano

		Inóculos	Cargas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Mediana	Q3
Metano ($L_{\text{metano}} \cdot \text{dia}^{-1}$)	B		C1 0,67	0,1290	0,0271	20,98	0,1157	0,1182	0,1477
			C2 1,00	0,6289	0,1092	17,37	0,5505	0,5909	0,1477
			C3 1,67	0,1753	0,0255	14,54	0,1526	0,1674	0,7263
			Total	0,3111	0,2415	77,62	0,1182	0,1773	0,5594
	S		C1 0,67	0,0591	0,0098	16,67	0,0493	0,0591	0,0689
			C2 1,00	0,1555	0,0829	53,29	0,0768	0,1970	0,2136
			C3 1,67	0,0386	0,01235	35,43	0,0256	0,0295	0,0468
			Total	0,0832	0,0703	84,56	0,0295	0,0542	0,1329

Na Tabela 38, observa-se que os maiores valores médios da produção de metano são referentes à carga de $1,00 \text{ gSV} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, cujo maior valor médio da produção de metano com a utilização de inóculo bovino foi $0,6289 L_{\text{metano}} \cdot \text{dia}^{-1}$. Os dados apresentam-se homogêneos, pois o coeficiente de variação (CV) foi menor que 30%, exceto para as cargas $1,00 \text{ gSV} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ e $1,67 \text{ gSV} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ com a utilização de inóculo suíno, onde os dados não podem ser considerados heterogêneos, conforme recomendado por PIMENTEL GOMES (2009).

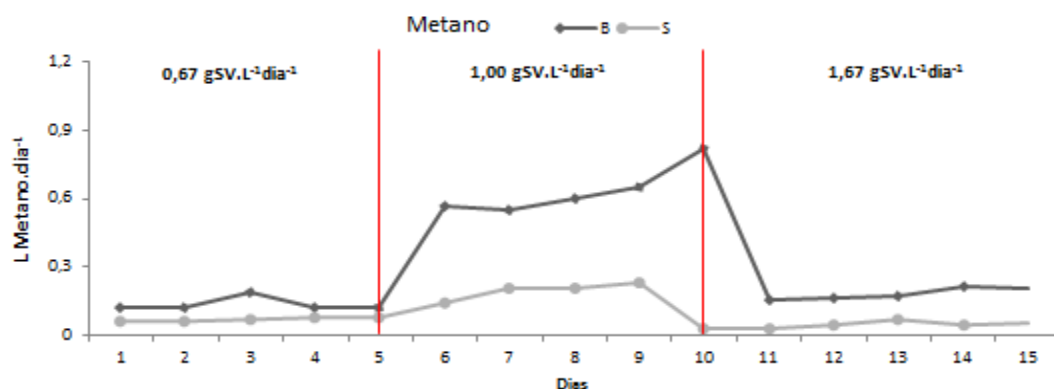


Figura 31. Produção de metano para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Para os dados da produção de metano, foi realizada a análise de variância, ao nível de 5% de significância, conforme Tabela 39. Observa-se que apenas os fatores carga e inóculo foram significativos ao nível de 5% de significância.

Tabela 39 Análise de variância para produção de metano

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	F	P-valor
Inóculo	1	13,861792	13,861792	84,9530	0,0000*
Erro 1	12	1,958037	0,163170		
Carga	2	9,920224	4,960112	20,1110	0,0000*
Interação	2	1,272445	0,636223	2,5800	0,1170
Erro 2	12	2,959702	0,246642		
Total	29	29,972200			

*significativo ao nível de 5% de significância.

O teste de médias para produção de metano em função do fator inóculo é apresentado na Tabela 40 e a maior média de produção de metano ocorreu com a utilização de inóculo bovino $0,311 \text{ L}_{\text{metano}}.\text{dia}^{-1}$, ou seja, $0,2279 \text{ L}_{\text{metano}}.\text{dia}^{-1}$ mais quando comparado com o inóculo suíno.

Tabela 40 Teste Tukey para o fator inóculo, ao nível de 5% de significância para a variável produção de metano

Inóculo	Metano ($\text{L}_{\text{metano}}.\text{dia}^{-1}$)	
Bovino	0,3111	A
Suíno	0,0832	B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Neste trabalho nota-se que ambos os inóculos produziram metano, contudo, observa-se que a produção com a utilização do inóculo bovino foi superior, demonstrando maior facilidade na degradação dos compostos presentes na cama de aviário. Desta forma, os resultados vêm de encontro aos relatados por Shah et al. (2014). Segundo os autores, a celulose é o biopolímero mais significativo nos resíduos sólidos e pode ser digerida por via anaeróbia. É necessária grande variedade de enzimas para a extensa hidrólise enzimática, encontrada em grande quantidade no rúmen, principalmente em função da presença das bactérias *Ruminococcus albus*, *flavefaciens Ruminococcus*, e *Succinogenes Fibrobacter*.

Catarino et al. (2009) objetivaram em seu trabalho otimizar a produção de metano em um sistema de biodigestor tubular, implantado em uma fazenda, em Tocantins – TO. O metano era produzido em baixa concentração, devido à cama de frango utilizada não possuir características ideais para tal produção (baixo pH em torno de 5,7, afluente pouco diluído e pequena concentração de bactérias metanogênicas). Concluíram que, ao se inocular o complexo enzimático (ORGANIASE®) ao biodigestor, e logo após algum tipo de dejetos animal (bovinos, suínos, equinos, etc.) que possuam rica flora intestinal, como forma de otimizar e acelerar a colonização do biodigestor com bactérias metanogênicas, a cama de frango é uma excelente matéria-prima para obtenção de metano.

O teste de médias para produção de metano em função do fator cargas é apresentado na Tabela 41. Foi possível observar que as cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ são estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância, e que a carga 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ difere estatisticamente das demais, pois apresentou a maior média de produção de metano 0,392 L_{metano}.dia⁻¹.

Tabela 41 Teste Tukey para o fator carga, ao nível de 5% de significância para a variável produção de metano

Cargas	Metano (L _{metano} .dia ⁻¹)	
C1 – 0,67	0,0940	B
C2 – 1,00	0,3922	A
C3 – 1,67	0,1051	B

Nota: Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Na Tabela 41, observa-se decréscimo na produção de metano com o aumento da carga de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ para 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹. Desta forma, os resultados obtidos nesse trabalho estão de acordo com Yadvika et al. (2004), os quais notaram que a produção de biogás é altamente dependente da carga, porém, no caso da produção de metano, verificou-se que houve aumento com a redução do carregamento.

Os autores Salminen & Rintala (2002) relatam rendimento de metano em torno de 0,55 m³_{metano}.kgSV⁻¹, e, segundo Webb & Hawkes (1985), a média encontrada de metano

variou entre 0,14 e 0,22 $\text{m}^3_{\text{metano}}.\text{kgSV}^{-1}$, correspondendo a 59% da produção de biogás. Fukayama (2008) encontrou em média valores de 82,5 % de metano em substratos de cama de frango de primeiro lote com casca de amendoim sem separação de sólidos diluídas em água, valor próximo ao encontrado nesse experimento (Figura 32).

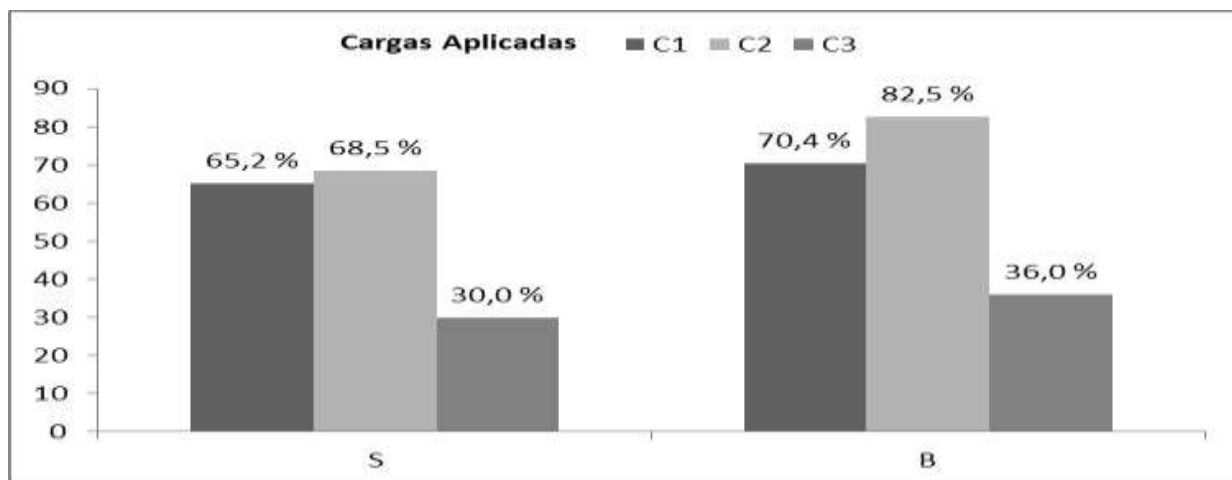


Figura 32. Comparação da (%) percentagem de metano no biogás para inóculo bovino (B) e suíno (S).

Observa-se redução da porcentagem de metano em ambos os casos para a última carga (Figura 32). Contudo, ao serem analisados os valores médios da produção de biogás e de metano, nota-se que as quantidades produzidas de metano foram próximas para a primeira e terceira carga. Mas, a quantidade de biogás produzido, em relação a essas duas cargas, foi maior na última carga, como pode ser observado na Tabela 42. A última carga produziu a mesma quantidade de metano que a primeira carga, mas a diferença é que a produção de biogás foi maior na última carga, logo, a porcentagem de metano em relação ao volume total de biogás foi maior quando se produziu menos biogás.

Tabela 42 Médias utilizadas para comparação da percentagem (%) de metano no biogás

Inóculos	Cargas	Biogás ($\text{L}.\text{dia}^{-1}$)	Metano ($\text{L}.\text{dia}^{-1}$)
B	C1 0,67	0,1831	0,1290
	C2 1,00	0,7618	0,6288
	C3 1,67	0,4864	0,1752
S	C1 0,67	0,0906	0,0590
	C2 1,00	0,2269	0,1555
	C3 1,67	0,1162	0,0344

Ao se analisar a média percentual total de produção de metano para o bovino e suíno, nota-se que a utilização de inóculo bovino foi de 63,0 % e a de inóculo suíno de 54,5%, ou seja, 8,5% a mais do que com a utilização de inóculo suíno.

Os resultados obtidos nesse trabalho vêm de encontro aos relatados por Kelleher et al. (2002). Segundo os autores, o processo de digestão anaeróbia é uma conversão relativamente eficiente para a produção de biogás e apresenta teor médio de metano de 60% para a cama de aviário. Costa (2009) encontrou valores entre 70 e 90 % de metano, em tratamentos que continham cama de aviário diluída em digestato e água e cama de frango diluída em digestato, respectivamente.

5.2.13 Digestatos

Os valores médios dos micronutrientes (Zn, Fe, Cu e Mn) em mg.L^{-1} estão apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 Análise descritiva para micronutrientes

	Inóculos	Cargas	Média	Desvio Padrão	CV (%)	Q1	Medianas	Q3
Zn (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	2,20	0,84	38,21	1,50	1,96	3,13
		C2 1,00	2,41	0,64	26,84	1,82	2,32	3,11
		C3 1,67	1,95	0,18	9,56	1,77	1,95	2,15
		Total	2,19	0,57	26,24	1,79	1,96	2,71
	S	C1 0,67	2,35	0,31	13,19	2,05	2,34	2,67
		C2 1,00	2,04	0,16	7,88	1,87	2,06	2,19
		C3 1,67	3,36	1,07	31,93	2,26	3,41	4,41
		Total	2,58	0,82	31,8	2,05	2,26	3,04
Fe (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	4,63	0,38	8,27	4,30	4,54	5,05
		C2 1,00	3,09	1,12	36,23	1,97	3,08	4,21
		C3 1,67	5,04	0,16	3,27	4,89	5,00	5,22
		Total	4,25	1,07	25,21	3,65	4,54	5,03
	S	C1 0,67	5,64	0,33	5,92	5,31	5,64	5,98
		C2 1,00	4,91	1,59	32,50	3,35	4,87	6,55
		C3 1,67	3,94	1,35	38,88	2,14	3,46	4,86
		Total	4,68	1,42	30,38	3,41	4,86	5,81
Cu (mg.L^{-1})	B	C1 0,67	0,31	0,11	35,75	0,19	0,33	0,41
		C2 1,00	0,27	0,06	23,27	0,20	0,28	0,33
		C3 1,67	0,35	0,07	19,50	0,29	0,35	0,43
		Total	0,31	0,08	25,79	0,24	0,33	0,38
	S	C1 0,67	0,47	0,11	24,74	0,37	0,45	0,60
		C2 1,00	0,42	0,04	10,93	0,37	0,42	0,47
		C3 1,67	0,52	0,08	15,37	0,43	0,53	0,59
		Total	0,47	0,08	18,07	0,40	0,45	0,56

Mn (mg.L ⁻¹)	B	C1 0,67	1,38	0,21	15,65	1,13	1,47	1,53
		C2 1,00	1,33	0,12	9,56	1,19	1,34	1,45
		C3 1,67	1,17	0,17	14,57	1,05	1,10	1,37
		Total	1,29	0,17	13,71	1,11	1,34	1,46
	S	C1 0,67	1,36	0,04	3,31	1,33	1,34	1,42
		C2 1,00	1,38	1,05	3,67	1,34	1,35	1,43
		C3 1,67	1,31	0,09	7,0	1,21	1,31	1,40
		Total	1,35	0,06	4,86	1,32	1,34	1,41

Na Tabela 43, observa-se que os maiores valores médios de Zn são referentes à carga 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹. Os valores de Fe são referentes às cargas 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente.

Os maiores valores de Cu são referentes à carga 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, e os de Mn à carga gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente.

E, na Tabela 44, observam-se os valores médios dos macronutrientes (K, N, Mg, Na, Ca) em mg.L⁻¹.

Tabela 44 Análise descritiva para macronutrientes

	Inóculos	Cargas	Média	Desvio	Coef.	Q1	Medianas	Q3
				Padrão	Variação			
K (mg.L ⁻¹)	B	C1 0,67	534,60	44,60	8,51	476,60	501,80	516,10
		C2 1,00	484,70	42,70	8,81	436,10	532,60	564,60
		C3 1,67	478,60	17,70	3,69	461,60	477,40	496,90
		Total	496,00	38,70	7,81	469,10	469,90	524,30
	S	C1 0,67	429,80	27,80	6,46	401,70	430,40	457,30
		C2 1,00	486,24	15,50	3,19	471,35	485,09	502,29
		C3 1,67	528,82	10,86	2,05	518,31	528,16	539,99
		Total	481,60	46,20	9,59	443,90	485,10	523,20
N (mg.L ⁻¹)	B	C1 0,67	350,00	24,60	7,02	322,70	357,00	265,30
		C2 1,00	359,33	3,52	0,98	355,60	359,80	255,36
		C3 1,67	344,87	5,70	1,65	340,90	342,30	264,88
		Total	351,40	14,23	4,05	341,60	355,60	361,20
	S	C1 0,67	356,80	67,50	18,91	280,00	383,60	406,70
		C2 1,00	333,43	50,90	5,01	314,30	340,90	345,10
		C3 1,67	367,30	18,37	13,87	328,30	348,60	424,90
		Total	352,50	45,60	12,94	321,30	345,10	395,10

Mg (mg.L ⁻¹)	B	C1 0,67	75,69	5,65	7,46	70,35	75,12	81,60
		C2 1,00	54,95	13,99	25,47	42,28	52,28	70,08
		C3 1,67	50,84	11,03	21,70	39,83	50,81	61,89
		Total	60,49	14,85	24,54	46,64	61,89	72,73
	S	C1 0,67	103,50	102,70	99,24	35,00	53,90	221,60
		C2 1,00	62,88	3,19	5,08	60,01	62,35	66,32
		C3 1,67	63,78	6,97	10,93	56,68	64,04	70,62
		Total	76,70	55,30	72,06	55,30	62,30	68,50
	B	C1 0,67	316,60	23,60	7,45	297,10	309,90	342,80
		C2 1,00	231,90	25,60	11,02	207,40	230,00	258,40
		C3 1,67	139,42	7,30	5,24	132,92	138,01	147,32
		Total	229,30	78,80	34,35	142,70	230,00	303,50
Na (mg.L ⁻¹)	S	C1 0,67	259,82	17,23	6,63	249,78	248,96	279,71
		C2 1,00	217,90	21,70	9,98	193,40	225,30	234,90
		C3 1,67	157,75	9,57	6,07	148,55	157,04	167,65
		Total	211,80	46,80	22,09	162,30	225,30	249,90
	B	C1 0,67	387,20	40,60	10,49	342,20	398,30	421,10
		C2 1,00	366,92	14,85	4,05	349,81	374,52	376,43
		C3 1,67	305,10	60,00	19,66	247,10	301,30	366,90
		Total	353,10	52,30	14,82	321,80	366,90	387,40
	S	C1 0,67	291,80	35,50	12,16	216,40	283,30	330,80
		C2 1,00	361,22	15,21	4,21	346,01	316,22	376,43
		C3 1,67	386,00	35,70	9,24	346,00	397,30	414,60
		Total	346,30	49,80	14,37	307,00	346,00	386,90

Na Tabela 44, observa-se que os maiores valores médios de K são referentes às cargas 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, para os inóculos bovino e suíno, respectivamente. Nota-se diminuição na concentração deste elemento com a utilização do inóculo bovino e aumento com o inóculo suíno em relação ao aumento das cargas.

Os maiores valores em média de N₂ são referentes às cargas de 1,00 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (359,33 mg.L⁻¹) e 1,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹ (367,30 mg.L⁻¹), para os inóculos bovino e suíno, respectivamente. Além disso, os valores de K e N₂ estão abaixo dos valores encontrados no efluente da biodigestão com cama de aviário por Singh et al (2002) potássio (1632 mg.L⁻¹) e nitrogênio (1570 mg.L⁻¹), relatando serem superiores ao recomendado para o cultivo de algas. Assim, torna-se necessária a diluição antes de ser utilizado como meio de crescimento, para coincidir com média N (20-250 mg.L⁻¹)

Os maiores valores em média de Mg e de Na são referentes à carga 0,67 gSV.L⁻¹.dia⁻¹, além de ser observada diminuição da concentração desses elementos com o aumento das cargas.

Os valores de Ca são referentes às cargas de $0,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$ e $1,67 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$, para a utilização de inóculos bovino e suíno, respectivamente. Também foi observado aumento na concentração de cálcio (Ca) com o aumento das cargas para o inóculo suíno.

Os resultados apresentados corroboram com Tessaro et al. (2015), os quais avaliaram a biodigestão com cama de aviário ao se variar a presença de digestato e água. Concluíram que o digestato produzido apresentou macro e micronutrientes assimiláveis pelos vegetais, tais como: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, sódio, ferro, boro, cobre, zinco e manganês.

5.2.14 Lodo

Ao final do experimento, os lodos dos biodigestores foram quantificados, mas não apresentaram diferenças em relação ao volume de lodo gerado no processo (1,40 litros), sendo caracterizados em relação aos nutrientes, conforme apresentado na Tabela 45.

Tabela 45 Caracterização dos nutrientes do lodo bovino (LB) e suíno (LS)

Características	LB	LS
Zn (mg.L^{-1})	41,98	43,54
Fe (mg.L^{-1})	140,60	134,11
Cu (mg.L^{-1})	12,40	13,80
Mn (mg.L^{-1})	51,70	60,88
K (mg.L^{-1})	457,89	526,69
Mg (mg.L^{-1})	328,24	316,92
Na (mg.L^{-1})	140,49	151,32
Ca (mg.L^{-1})	2815,58	3630,22

Os lodos bovino e suíno apresentaram concentração muito próxima em relação aos nutrientes observados e apresentam maior concentração de K e de Ca. Segundo Tessaro et al. (2015), a utilização da cama de aviário como digestato é economicamente desejável, uma vez que representa recurso interno da propriedade rural e é um resíduo que contém elevada concentração de nutrientes. Também foi realizada a determinação das fibras em detergente neutro (FDN), detergente ácido (FDA) e lignina (LDA).

Tabela 46 Composição da fração fibra para a cama de aviário (CA), lodo bovino (LB) e lodo suíno (LS)

Amostra	CA	LB	LS
FDN (%)	23,04	41,05	52,44
FDA (%)	11,52	28,91	40,92
LIG (%)	0,71	18,15	26,46

É possível observar, na Tabela 46, que o lodo bovino apresentou os menores valores em relação às porcentagens de FDN, FDA e LIG. Isso evidencia as vantagens de sua utilização como inóculo em função de sua maior capacidade na degradação das frações fibrosas e do seu melhor desempenho quando comparado ao inóculo suíno, principalmente em relação à produção de biogás, produção específica de biogás por STV e DQO e produção de metano.

Os valores da composição fibrosa da cama de aviário são menores do que os apresentados por Azevedo et al. (1999), os quais avaliaram a composição fibrosa de camas de frango, produzidas com raspa de madeira, capim-elefante, sabugo com palha e parte aérea da mandioca, com valores de FDN 72,17%, FDA 50,48% e lignina 13,5% para a cama de frango com raspa de madeira. Tal fato pode ser justificado pela cama de aviário utilizada no experimento ter adição de apenas uma camada de 8 cm de maravalha no início do lote, sem sucessivas adições para não prejudicar sua reutilização.

Orrico Junior et al. (2014) verificaram a influência das diferentes doses de compostos orgânicos produzidos com dois tipos de cama de aviário. Não observaram diferença significativa entre os tipos de compostos orgânicos nem na interação compostos x dose. Além disso, os teores de FDN, FDA, celulose, hemicelulose e lignina apresentaram comportamento linear negativo em função das doses crescentes de nitrogênio. Contudo, recomendaram o uso de ambos os compostos, sem prejuízo na qualidade das plantas avaliadas.

Ao comparar a cama de aviário com os lodos, observa-se aumento das porcentagens de FDN, FDA e LIG, que correspondem às fibras de difícil decomposição. Tal fato possivelmente está relacionado com o acúmulo da maravalha presente na cama de aviário ao longo do experimento (7 meses). Azevedo et al. (1999) avaliaram ainda a digestibilidade da matéria seca e da fração fibrosa inferior concluindo que a cama de frangos de raspa de madeira apresentou digestibilidade da matéria seca e da fração fibrosa inferior aos demais tipos MS 42,6%, FDN 40% e FDA 30%.

6 CONCLUSÃO

A cama de aviário pode ser utilizada como substrato para digestão anaeróbia com a finalidade de aproveitamento energético.

A utilização de digestato como inóculo no processo de biodigestão da cama de aviário apresentou resultados satisfatórios em relação à produção de biogás, uma vez que o tratamento sem adição de inóculo apresentou a menor média de produção de biogás.

Em relação à comparação entre os inóculos (digestato bovino e suíno), é possível concluir que ambos são indicados no processo de biodigestão com cama de aviário, pois os mesmos se mantiveram estáveis (relação AV/AT e AI/AP) e com pH próximos à neutralidade, não sendo observadas inibições de amônia.

Observou-se que o inóculo suíno apresentou as melhores médias de remoção de ST, STV, DQO e maiores concentrações de potássio e cálcio no lodo gerado.

O inóculo bovino apresentou os maiores valores em relação à produção de biogás, produção específica de biogás por SV e DQO e produção de metano. A concentração de metano no biogás manteve-se em 63% para o inóculo bovino e 54,5% para o suíno.

Além disso, o inóculo bovino se mostrou mais eficiente na degradação da composição fibrosa da cama de aviário em comparação ao inóculo suíno, o que justifica seu melhor desempenho na produção de biogás e metano.

Por fim, com base nos resultados obtidos, para o processo de biodigestão com cama de aviário, recomenda-se a utilização de digestato bovino como inóculo e a utilização da carga de alimentação de $1,00 \text{ gSV.L}^{-1}.\text{dia}^{-1}$.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se o teste com diferentes proporções de mistura entre os inóculos (bovino e suíno) em trabalhos posteriores.

Nesse trabalho, os inóculos foram comparados considerando a mesma proporção em relação ao volume. E para trabalhos posteriores, recomenda-se a comparação em relação à concentração de sólidos.

Também sugere-se investigar o comportamento do processo quando se operam biodigestores por um tempo maior.

8 REFERÊNCIAS

- AIRES, A. M.; LUCAS JÚNIOR, J.; PRAES, M. F. M.; NASCIMENTO, J.; CARDOSO, P. Quantificação e caracterização de biogás gerado na biodigestão anaeróbia de cama de frangos de corte com ou sem separação de frações sólida e líquida. **III Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management**. São Pedro - SP, 2013.
- ALCANTARA, M. S. **Avaliação de biodigestor tubular na degradação anaeróbia de cama de frango de corte**. 2012. 48f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.
- AMARAL A. C.; KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; TAPPARO, D.; BORTOLINI, J.; TAVARES, M. H. F. Recuperação energética através da produção de metano via digestão anaeróbia de cama de frango de corte. **Conference: International Symposium on Emissions of Gas and Dust from Livestock - Emili 2015**, Florianópolis, SC, 2015.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21th ed. Washington, DC – EUA: Ed. American Public Health Association, 2005. 1600 p.
- AQUINO, S.; CHERNICHARO, C.; FORESTI, E. Metodologias para determinação da Atividade Metanogênica Específica (AME) em lodos anaeróbios. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 192-201, 2007.
- AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.
- ARAÚJO, I. R.C. **Tratamento de água residuária de fecularia e produção de biogás em reator anaeróbio de leito fixo e fluxo contínuo**. 2015. 74f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola).). Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2015.
- AVILA, V. S.; ABREU, V, M. N.; FIGUEIREDO, E. A. P.; BRUM, P. A. R.; OLIVEIRA, U. **Valor Agrônomo da Cama de Frangos após Reutilização por Vários Lotes Consecutivos**. Comunicado Técnico 466 – Embrapa, 4p., 2007.
- AZEVEDO, A. R.; ALVES, A. A.; AZEVEDO JUNIOR, A. R. Digestibilidade *in Vivo* da Matéria Seca e Fração Fibrosa de Cama de Frangos. **Revista. Brasileira de Zootecnia**. v. 28, p. 132-136, 1999.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação Agrícola**. Editora Afiliada. FUNEP, 4^a ed., Jaboticabal, 2009.
- BARANA A. C.; CEREDA, M. P. Cassava wastewater (manipueira) treatment using a two-phase anaerobic biodigestor. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v. 20, Campinas, 2000.
- BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. 75f. Dissertação Mestrado (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Curso de Pós-graduação em Engenharia civil e ambiental da faculdade de tecnologia da universidade de Brasília, BRASÍLIA –DF, 2009.
- BENABDELJELIL, K.; AYACHI, A. Evaluation of alternative litter materials for poultry. **J. Appl. Poultry Res**. v. 5, p. 203-209, 1996.

BOLAN, N. S.; SZOGI, A. A.; CHUASAVATHI, T.; SESHADRI, B.; ROTHROCK JR., M. J.; PANNEERSELVAM, P. Uses and management of poultry litter. **World's Poultry Science Journal**, v. 66, p. 673-698, 2010.

BORTOLINI, J. **Produção de mudas de espécies arbóreas nativas para a recuperação de áreas degradadas utilizando cama de aviário e lodo de esgoto**. 2014. 44f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Curso de Engenharia Ambiental, 2014.

BORTOLINI, J.; TAVARES, M. H.F.; FREITAG, D.; MACHADO, E. S.; KUCZMAN, O. Avaliação do uso de inóculo na biodigestão anaeróbia de cama de aviário. **Congresso Brasileiro de Produção Animal e Sustentável**. III ANISUS, v. 3, p. 535, p. 174-477. Chapecó, SC, 2015.

BOUALLAGUI, H.; LAHDHEB, H.; BEN ROMDAN, E.; RACHDI, B.; HAMDI, M. Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. **Journal of Environmental Management**. Tunis, n. 90, p. 1844-1849, 2009.

BRASIL. Instrução Normativa nº 8, de 25 de março de 2004. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

BUENO, R. F. Comparação entre biodigestores operados em escala piloto para produção de biogás alimentado com estrume bovino. **HOLOS Environment**, v. 10, n.1, 2010.

CAMABBRO, L.; DIAZ, J.M.; ROMERO, F. Final treatments for anaerobically digested piggery slurry effluents. **Biomass and Bioenergy**. v. 11, n. 6, p. 483-489, 1996.

CAMPOS, F. P; NUSSIO, C. M. B.; NUSSIO, L. G. **Métodos de análises de alimentos**. Piracicaba: FEALQ. 135p. 2004.

CARREAS, N. **O biogás**. Programa de capacitação em energias renováveis – ONUDI. p. 151, 2013.

CATARINO, R. P.; GONZÁLEZ, A. P. N.; OLIVEIRA, L. R. P. Otimização da produção de metano na biodigestão da cama-de-frango. **I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Geração de Energia a partir de Resíduos Animais**. Florianópolis – SC, 2009.

CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de efluentes industriais**. Editora JE CAVALCANTI, 2009, 453p.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAME, K.S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4044-4064, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CHIABAI JÚNIOR, J.; CAULY, J. M. S.; ROMANHA, P. R. L.; PUGET, F. P. Aproveitamento de resíduos da avicultura para a produção de energia elétrica. **III Conferência Internacional de Gestão de Resíduos Sólidos**, 2013.

CHINELLATO, G; CAVINATO, C; BOLZONELLA, D; HEAVEN, S; BANKS, C. J. Biohydrogen production from food waste in batch and semi-continuous conditions: Evaluation of a two-phase approach with digestate recirculation for pH control. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 38, p. 4351- 4360, 2013.

CHOI, I. H.; MOORE JR. P. A. Effect of Various Litter Amendments on Ammonia Volatilization and Nitrogen Content of Poultry Litter. **J. Appl. Poult. Res.** v. 17, p. 454–462, 2008.

COSTA, J. C.; BARBOSA, S. G.; ALVES, M. M.; SOUSA, D. Z. Thermochemical pre- and biological co-treatments to improve hydrolysis and methane production from poultry litter. **Bioresource Technology.** p. 141–147, 2012.

COSTA, L. V. C. **Biodigestão anaeróbia da cama de frango associada ou não ao digestato obtido com dejetos de suínos: produção de biogás e qualidade do digestato.** 2009. 89f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

COSTA, L. V. C.; LUCAS JUNIOR, J.; PANOSSO, N. O.; SAGULA, A. L. JUNQUEIRA, J. B. Produção de biogás da cama de Frango peneirada com 3 e 6 % de sólidos diluídas no digestato de suíno. **Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais**, 2011.

CREMONEZ, P. A.; FEIDEN, A.; ZENATTI, D. C.; CAMARGO, M. P.; NADALETI, W. C.; ROSSI, E.; ANTONELLI, J. Biodigestão anaeróbia no tratamento de resíduos lignocelulósicos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v. 2, p. 21-35, 2013.

DOTTO, B. R.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarum Scientia - Ciências Naturais e Tecnológicas.** Santa Maria, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012.

DROSG, B. Process monitoring in biogas plants. **IEA Bioenergy**, ISBN 978-1-910154-03-8. 2013.

DUBLEN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and renewable resources: a introduction.** Wiley-VCH, 2011.

EMBRAPA. **Recomendações técnicas para produção, abate, processamento e comercialização de frangos de corte coloniais.** Embrapa Suínos e Aves, 2007.

FERNANDEZ, C. G.; ENCINA, P.A.G. Impact of substrate to inoculum ratio in anaerobic digestion of swine slurry. **Biomass And Bioenergy**, v. 33, p. 1065-1069, 2009.

FERREIRA, D. F. **SISVAR** - Sistema de análise de variância. Versão 5.3. UFLA, 2010.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e digestato.** 2008. 99f. Tese Doutorado (Ciências agrárias e Veterinárias). Curso de Pós-graduação na Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, São Paulo, 2008.

FUKAYAMA, E. H. LUCAS JUNIOR, J.; AIRES, A. M.; SILVA, A. A.; OLIVEIRA, R. A. Produção de biogás utilizando cama de frangos de corte. **I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Geração de Energia a partir de Resíduos de Animais.** Florianópolis – SC, 2009.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR.** 2003.106f. Dissertação Mestrado (Engenharia de Produção). Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2003.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores IBGE**. In: Estatística e produção pecuária – Resultados semestrais. 2014, p. 50. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/producaoagropecuaria/abate-leite-couro-ovos_201402_publ_completa.pdf> Acesso em: 05/01/2015.

JANG, H. M.; KIM, K. H.; HÁ, J. H.; PARK, J. M. Bacterial and methanogenic archaeal communities during the single-stage anaerobic digestion of high-strength food wastewater. **Bioresource Technology**, v. 165, p. 174-182, 2014.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M.; O'DWYER, T. F.; SUTTON, D.; LEAHY, M. J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 27–36, 2002.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 3, p. 1737–1744, 2011.

KUCZMAN, O.; GOMES, S. D.; TAVARES, M. H. F.; TORRES, D, G, B.; ALCÂNTARA, M. S. Produção específica de biogás a partir de manipueira em reator de fase única. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 143-149, 2011.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista de Política Agrícola**. Ano XV, n.3, 2006.

LUCAS JUNIOR, J.; SANTOS, T. M. B. Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás. **Simpósio sobre Resíduos da Produção Avícola**. Concordia-SC, 2000.

MINITAB. **Minitab for Windows Release 16**. State College: Minitab Inc., 2010.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. Editora Livros Técnicos e Científicos - LTC, 4ª ed., Rio de Janeiro, 2009.

NASIR, I. M.; GHAZI, T. I. M.; OMAR, R. Production of biogas from solid organic wastes through anaerobic digestion: a review. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** v. 95, p. 321–329, 2012.

OLIVEIRA, A. B. M.; ORRICO, A. C. A.; ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; SUNADA, N. S.; CENTURION, S. R. Biodigestão anaeróbia de efluente de abatedouro avícola. **Rev. Ceres**. Viçosa, v. 58, n. 6, p. 690-700, 2011.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; CENTURION, S. R.; SUNADA, N. S. Potencial bromatológico do capim Piatã cultivado em sistema orgânico. **Revista Agrarian**. Dourados, v. 7, n. 25, p. 447-453, 2014.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal -SP, v. 30, n. 3, p. 546-554, 2010.

PALHARES, J. C. P. **Uso de biodigestores para o tratamento da cama de frango: conceitos importantes para a produção de biogás**. 7 p., 2005.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F. Avaliação do desempenho físico-químico de um reator UASB construído em escala piloto na remoção de poluentes efluentes de suinocultura. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 5, n. 1, p. 79-88, 2010.

PEREIRA, E. L.; CAMPOS, C. M. M.; MOTERANI, F. Efeitos do pH, acidez e alcalinidade na microbiota de um reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) tratando efluentes de suinocultura. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 157-168, 2009.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), 15ª ed., Piracicaba, 2009.

RINALDI, C. R.; SCHOENHALS, M.; PASSIG, F. H.; FOLLADOR, F. C. Diagnóstico inicial do consumo de insumos e geração de resíduos da avicultura de corte. **Engenharia Ambiental**. Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 3, p. 161-182, 2012.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. **Journal of Water Pollution Control Federation**, Alexandria, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

ROCCON, Josiane. **Desempenho de frangos de corte e produção de energia em biodigestores, utilizando-se três tipos de cama**. 2014. iv, 83f. Dissertação (mestrado) - Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review. **Bioresource Technology**. v. 83, p. 13–26, 2002.

SANCHEZ, E.; BORJA, R.; TRAVIESO, L.; MARTIN, A.; COLMENAREJO, M. F. Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary up flow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste. **Bioresource Tecnology**, v. 96, p. 335-344, 2005.

SANCHEZ, R. J.; CORTACANS TORRE, J. A., GONZALEZ, C. I. Influence of Temperature, Agitation, Sludge Concentration and Solids Retention Time on Primary Sludge Fermentation. **International Journal of Chemical Engineering**. p. 8, 2012.

SANCHUKI, C. E.; SOCCOL, C. R.; CARVALHO, J. C.; SOCCOL, V. T.; NASCIMENTO, C.; WOICIECHOWSKI, A. L. Evaluation of poultry litter traditional composting process. **Brazilian Archives of Biology and Technology**. v. 54, n. 5, p. 1053-1058, 2011.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 25-36, 2004.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JUNIOR. J.; SAKOMURA, N. K. Efeitos de densidade populacional e da reutilização da cama sobre o desempenho de frangos de corte e produção de cama. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, 2005.

SANTOS, T. M. B. **Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frango de corte**. 2001. 167f. Tese (Doutorado em Produção Animal) -. Curso de Pós-graduação em Ciências Agrárias e Veterinárias/ UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

SHAH, F. A.; MAHMOOD, Q.; SHAH, M. M.; PERVEZ, A.; ASAD, S. A. Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: the Key Players of Anaerobiosis. **International Journal of Chemical Engineering**. p. 21, 2014.

SILVA, M. O. S. **Análises físico-químicas para o controle das estações de tratamento de esgoto**. São Paulo: Cetesb, 1977.

SILVEIRA, M. A.; KRETZER, S. G.; NAGAOKA, A. K.; ARROYO, N. A. R.; BAUER, F. C. Produção de biogás em biodigestores de tamanho reduzido abastecido com cama de aviário. **Acta Tecnológica**. v. 9, p. 9-15, 2014.

SINDIVIAPAR. Anuário Paranaense da Avicultura 2015. **Revista Avicultura do Paraná**. v. 44, p. 48 – Janeiro/Fevereiro, 2015.

SINGH, M.; REYNOLDS, D. L.; DAS, K. C. Microalgal system for treatment of effluent from poultry litter anaerobic digestion. **Bioresource Technology**. v. 102, p. 10841–10848, 2011.

SPERLING, M. V. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. v. 2. 211p. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 1996.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. 2001. 109f. Dissertação Mestrado (Biotecnologia). Instituto de Química do Campus de Araraquara, Curso de Pós-graduação em Biotecnologia, Araraquara – SP, 2001.

SUZUKI, A. B. P.; FEIDEN, A.; FERNANDES, D. M.; MARTINS, G. L.; FARIA, R. A. P. Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para geração de biogás. **Ambiência Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais**. Guarapuava, v. 8, p. 809-820, 2012.

TESSARO, A. A. **Potencial energético da cama de aviário produzida na região Sudoeste do Paraná utilizada como substrato para a produção de biogás**. 2011. 79f. Dissertação Mestrado (Desenvolvimento de Tecnologia - PRODETEC). Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) em parceria com o Instituto de Engenharia do Paraná (IEP), Curitiba-PR, 2011.

TESSARO, A. B.; TESSARO, A. A.; CANTÃO, M. P.; MENDES, M. A. Potencial energético da cama de aviário produzida na região sudoeste do paraná e utilizada como substrato para a produção de biogás. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá**. v. 8, p. 357-377, 2015.

TORRES, D. G. B. **Meios suporte no tratamento de manipueira**. 2009. 54f. Dissertação de Mestrado (Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná.). Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Cascavel, 2009.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; COLOMBI, R.; PERONI, L.; GODINHO, T. O. Estercos de origem animal em substratos para a produção de mudas florestais: atributos físicos e químicos. **Scientia Forestalis**., Piracicaba, v. 40, p. 455-462, 2012.

U.S. Department of Agriculture. **International egg and poultry review**. v. 17, n. 45, p. 1- 3, ISSN 1522-5100, 2014.

UBA - **União Brasileira de Avicultura**. Relatório Anual 2014. Disponível em: <http://www.ubabef.com.br/files/publicacoes/8ca705e70f0cb110ae3aed67d29c8842.pdf>. Acesso em: 05/01/2015.

VAN SOEST, P. J. Integrated feeding systems. In: **Nutritional ecology of the ruminant**. 2^a ed. Ithaca, Cornell University Press, p. 140 – 155, 1994.

VDI 4630, 2006. **Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests**. 92f. Verein Deutscher Ingenieure - VDI, Germany.

VIEIRA, S. **Estatística Experimental**. Editora Atlas, 2^a ed., São Paulo, 1999.

WEBB, A. R.; HAWKES, FREDA R. Laboratory scale anaerobic digestion of poultry litter: gas yield-loading rate relationships. **Agricultural Wastes**. v. 13 p. 31-49. Agricultural Wastes Elsevier Applied Science Publishers, 1985.

XAVIER, CRISTIANE DE A. N.; LUCAS JÚNIOR, J. Parâmetros de dimensionamento para biodigestores batelada operados com dejetos de vacas leiteiras com e sem uso de inóculo. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal-SP, v. 30, p. 212-223, 2010.

YADVIKA; SANTOSH, SREEKRISHNAN, T. R.; KOHLI, S., RANA, V. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques - a review. **Bioresource Technology**. v. 95, p. 1-10, 2004.

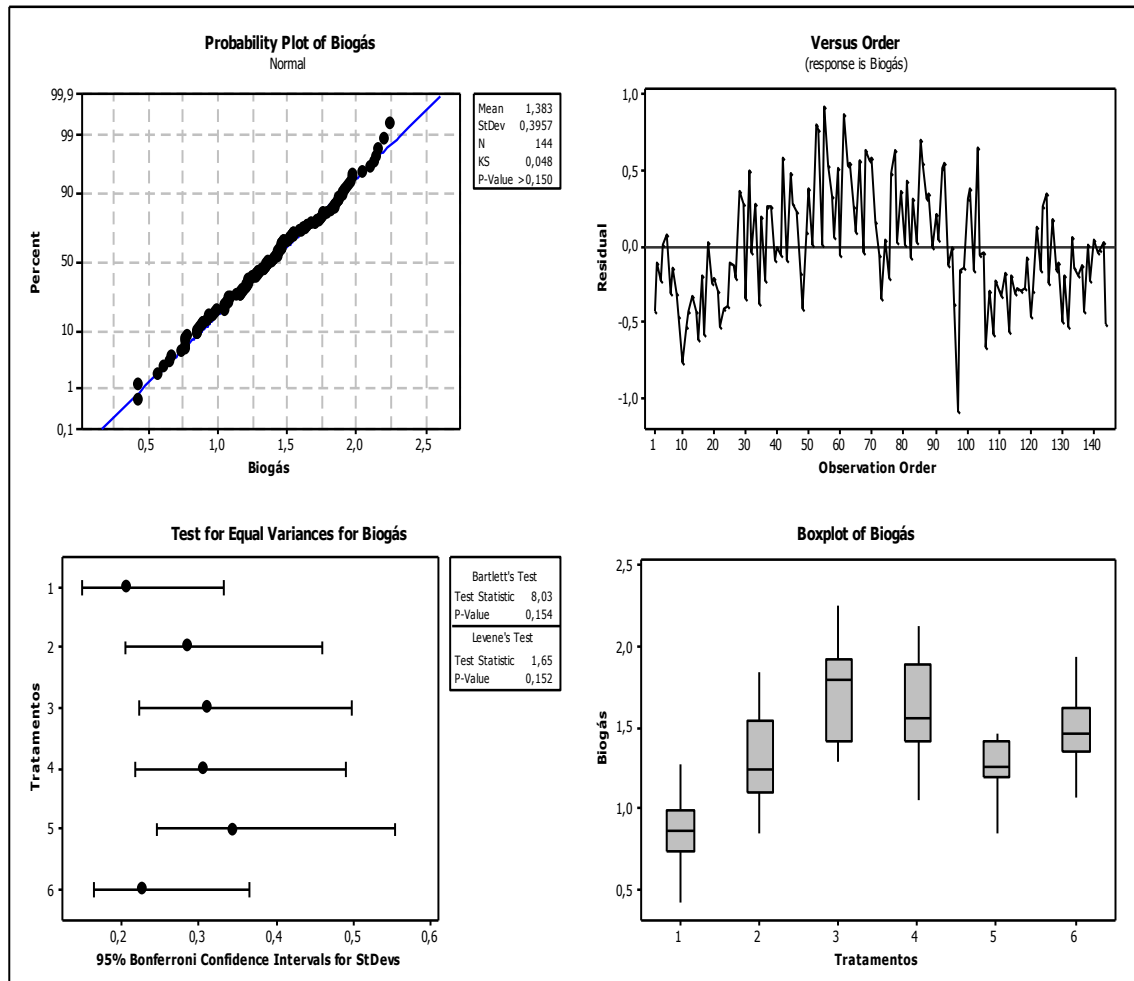
YETILMEZSOY, K. Integration of kinetic modeling and desirability function approach for multi-objective optimization of UASB reactor treating poultry manure wastewater. **Bioresource Technology**, v. 118, p. 89-101, 2012.

ZIGANSHIN, A. M.; LIEBETRAU, J.; PRÖTER, J.; KLEINSTEUBER, S. Microbial community structure and dynamics during anaerobic digestion of various agricultural waste materials. **Bioenergy and Biofuels**, v. 97, p. 5161-5174, 2013.

APÊNDICES

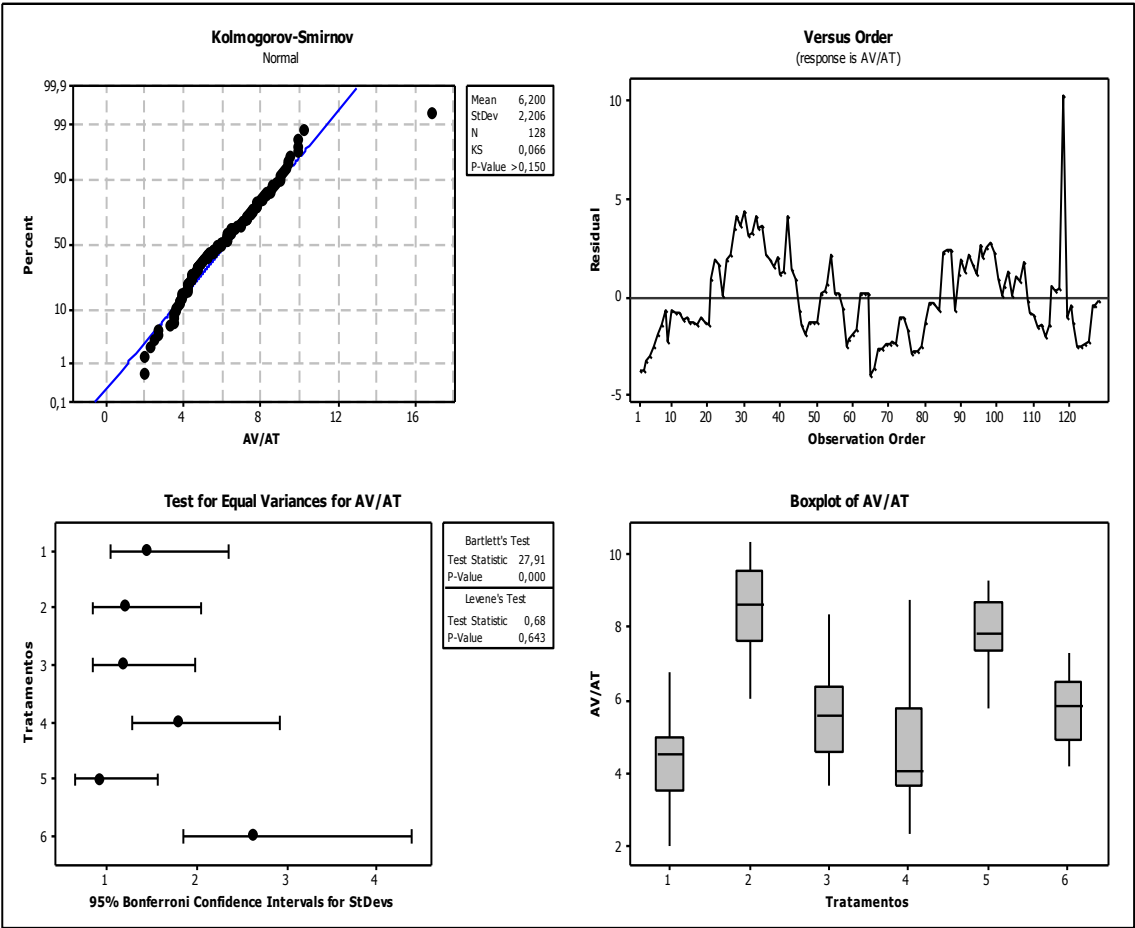
APÊNDICE A – RESULTADOS - FASE I

1. Biogás

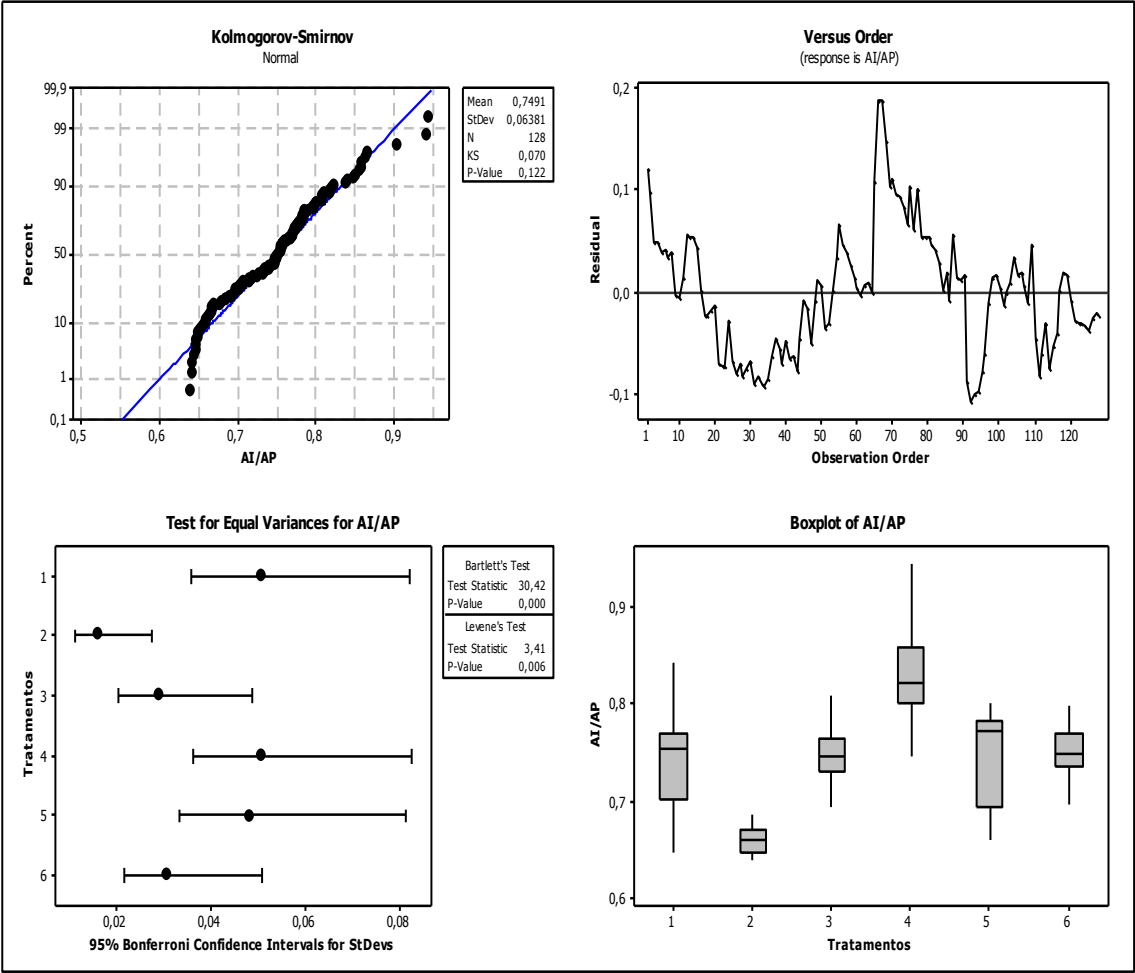


APÊNDICE B – RESULTADOS - FASE II

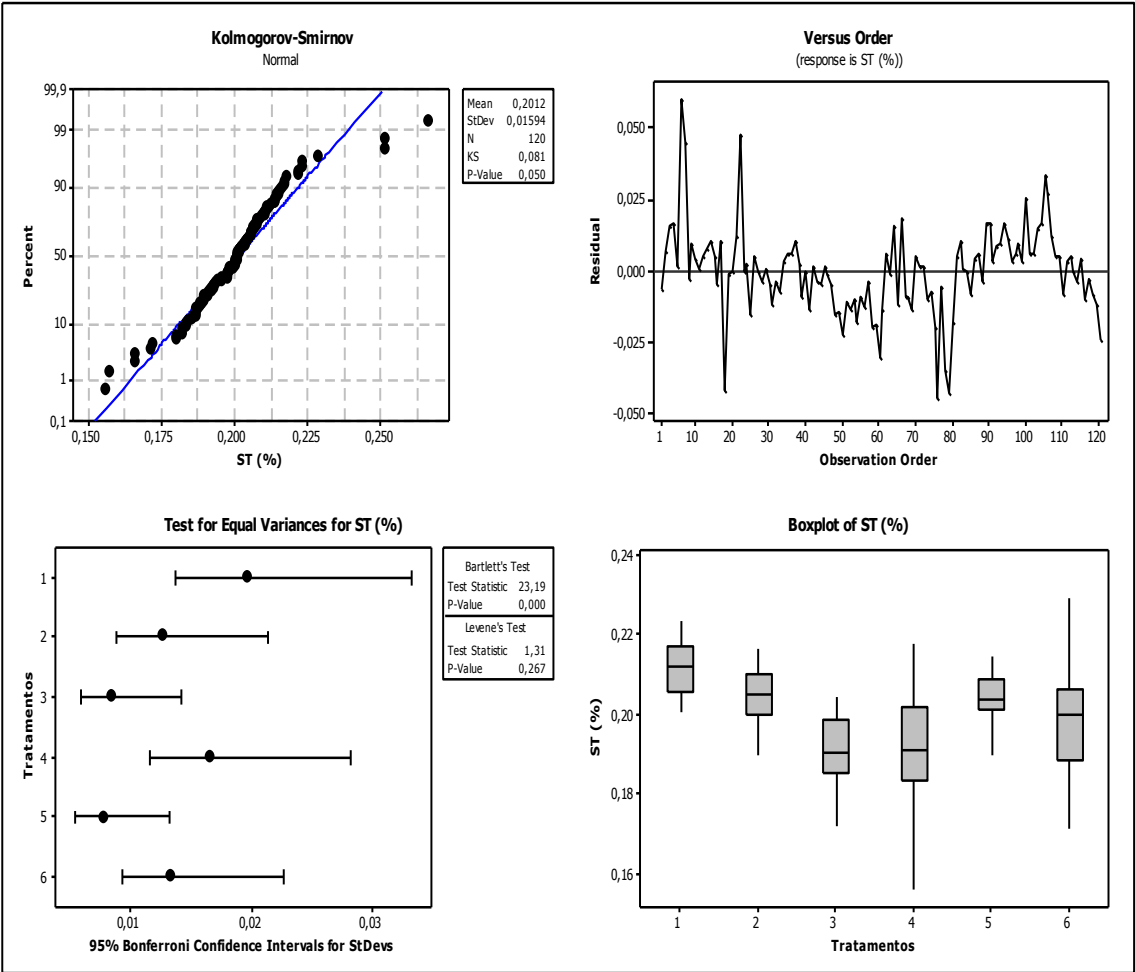
1. Relação AV/AT



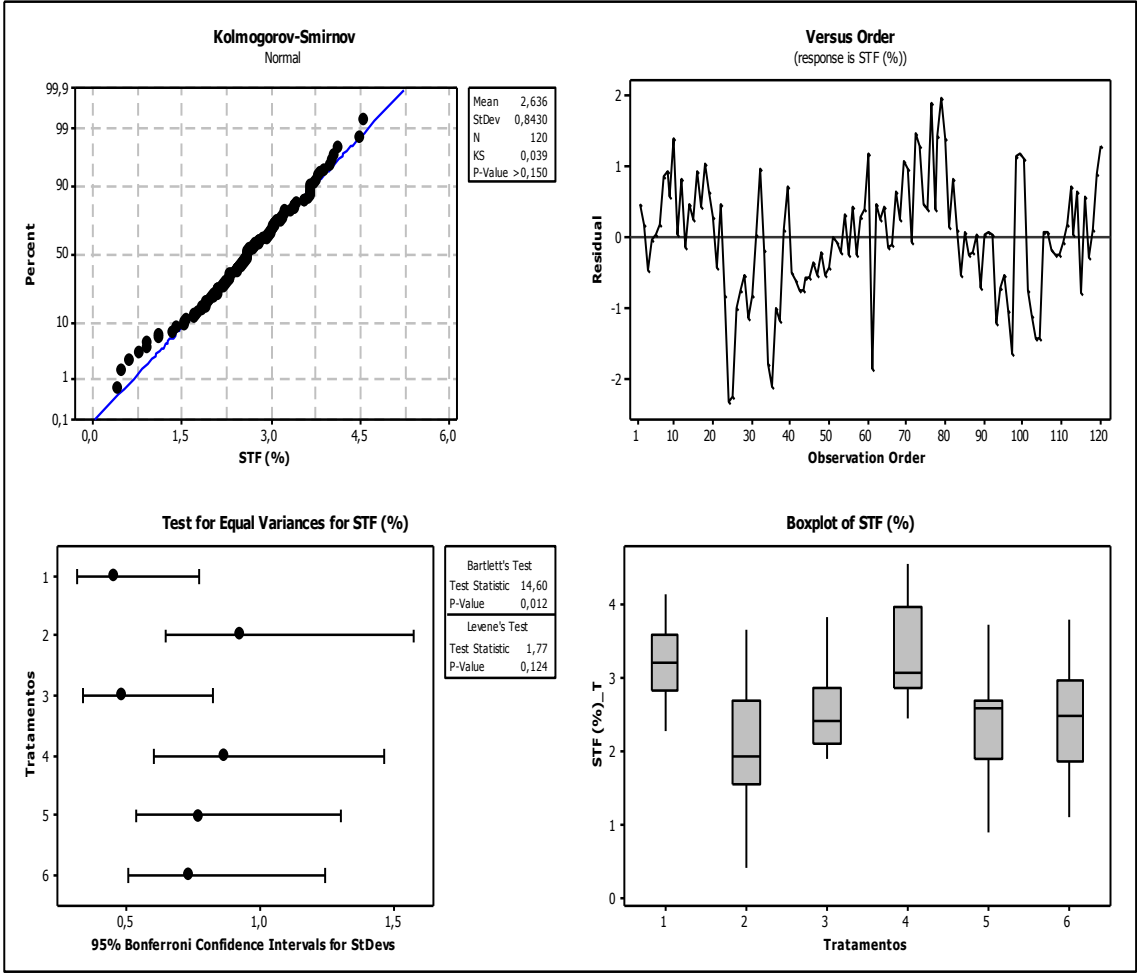
2. Relação AI/AP



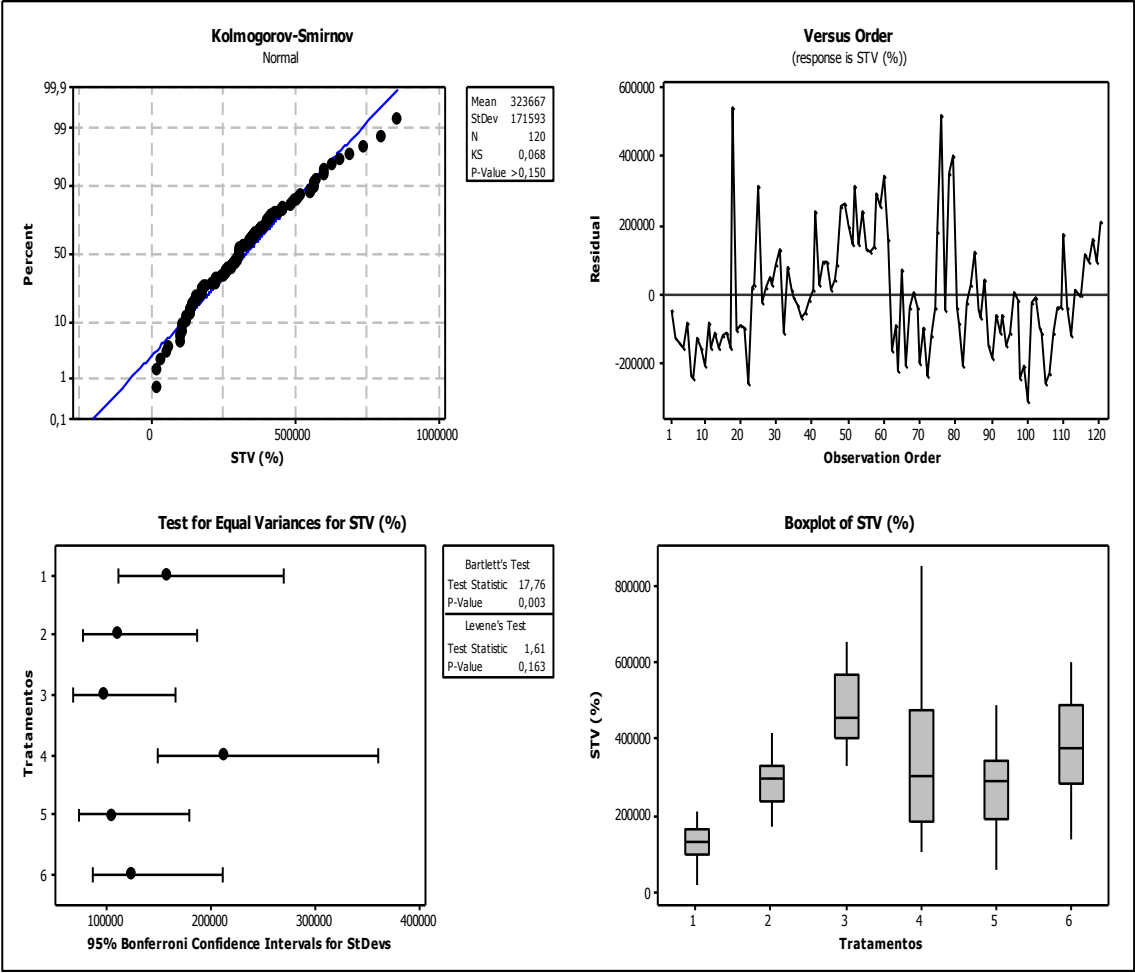
3. Remoção de Sólidos Totais



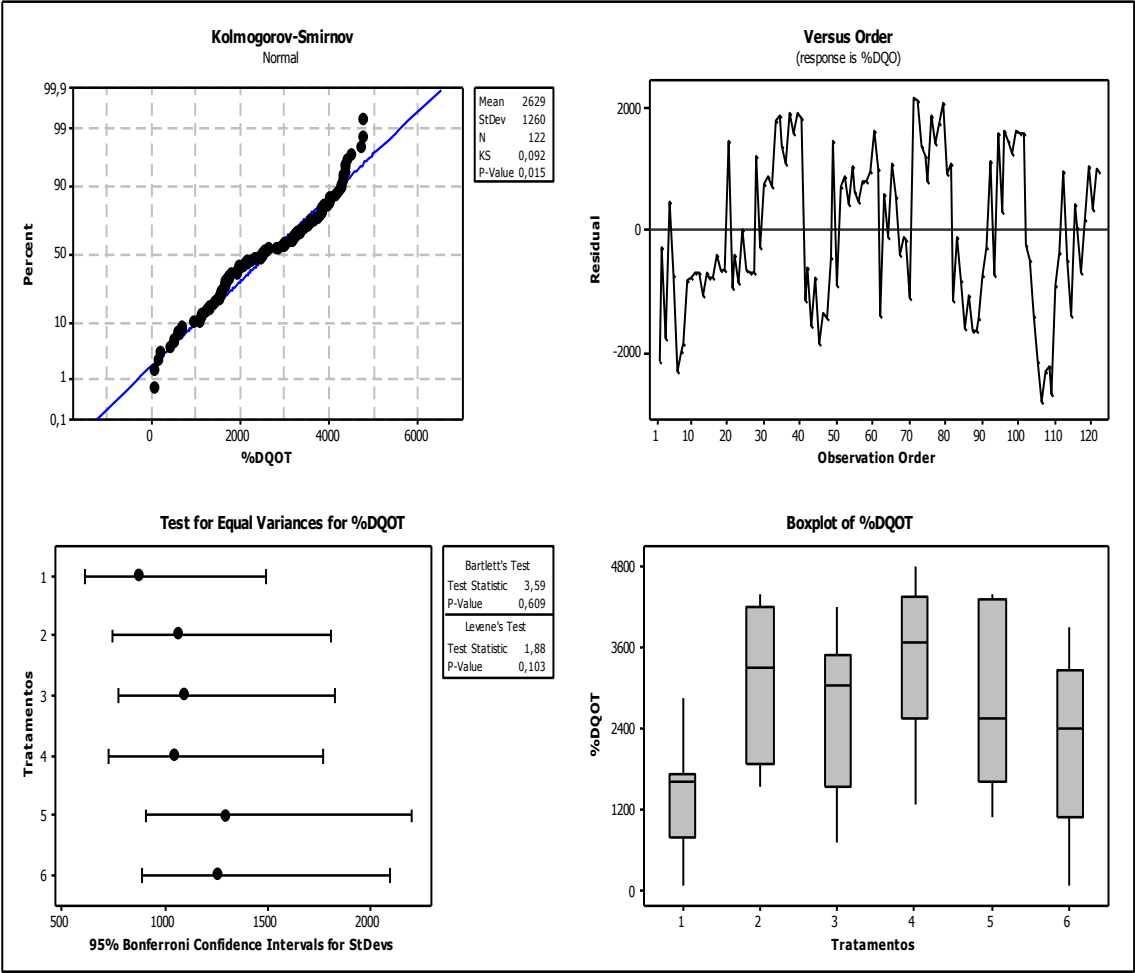
4. Remoção de Sólidos Totais Fixos



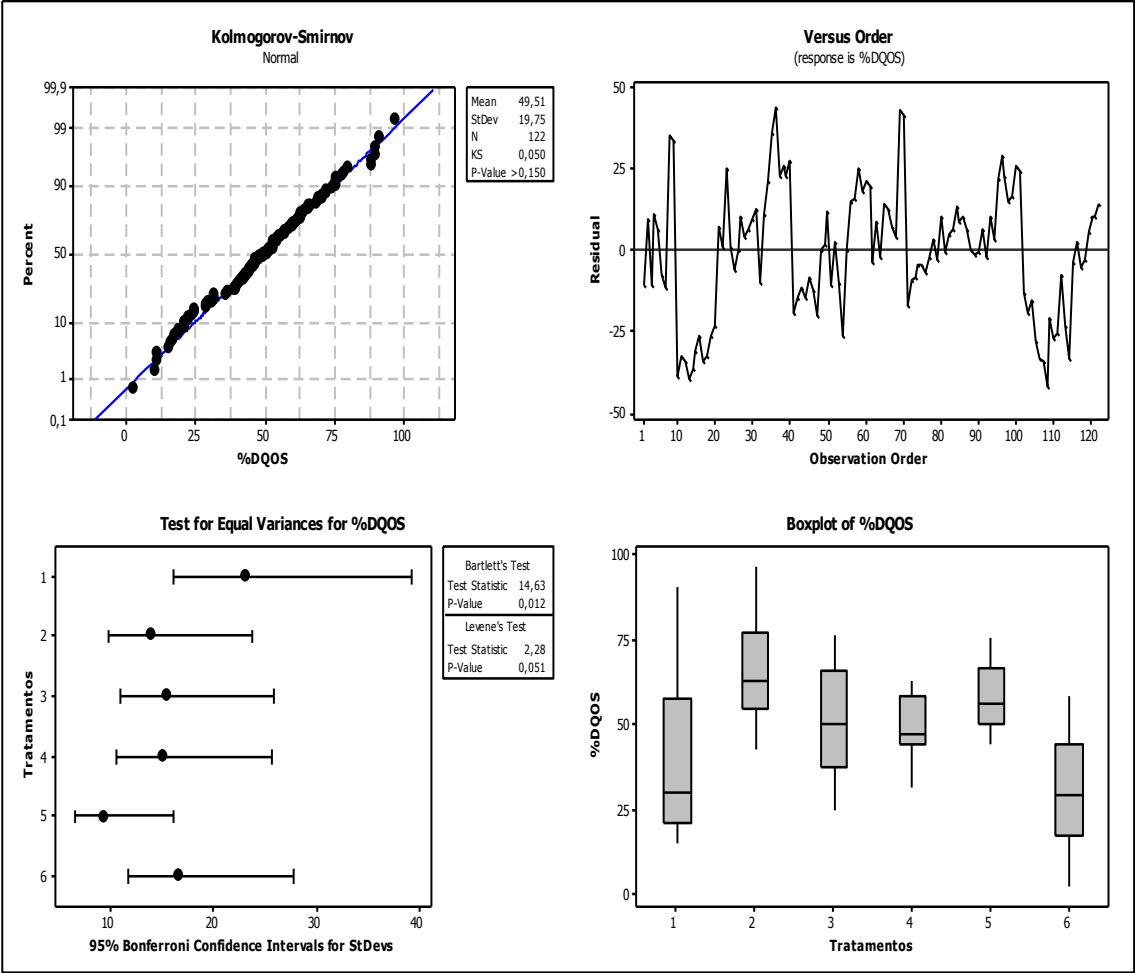
5. Remoção de Sólidos Totais Voláteis



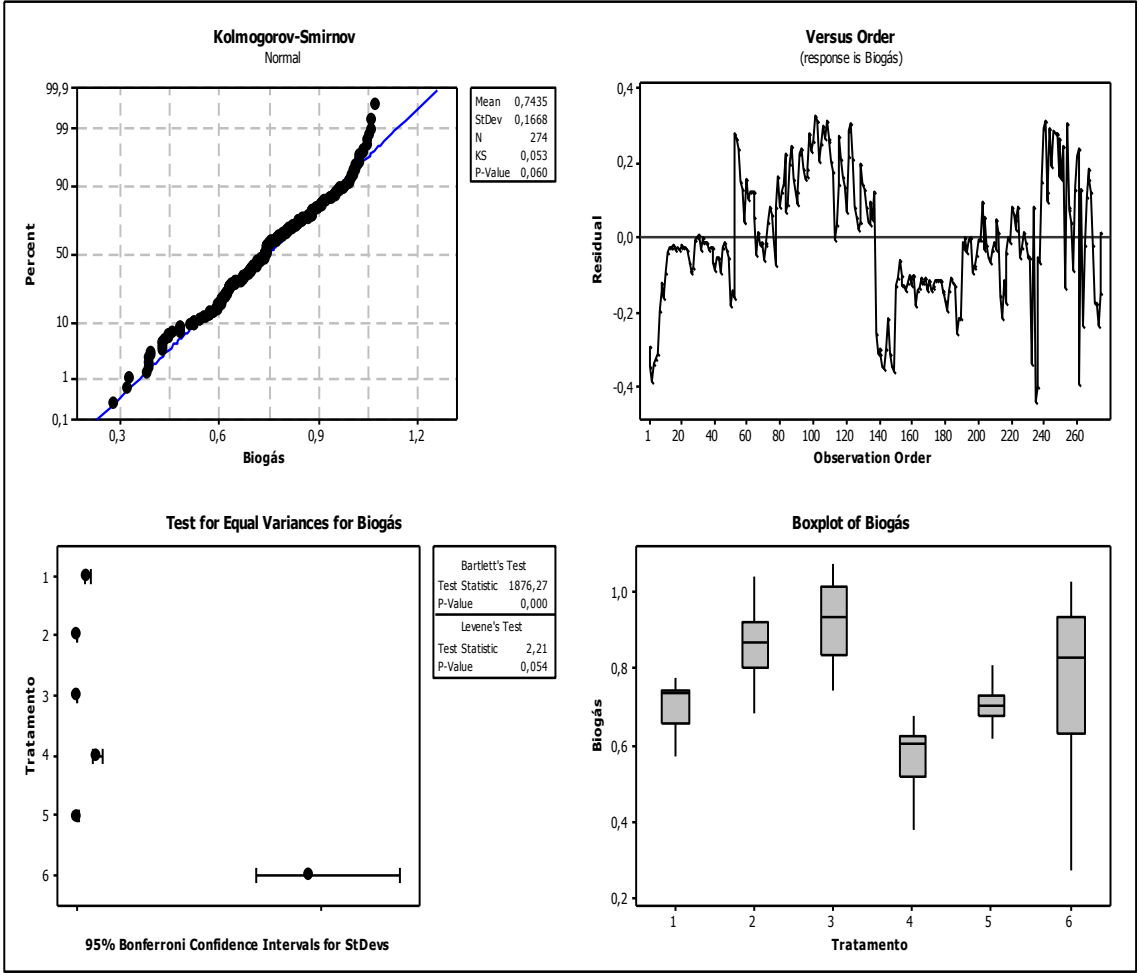
6. Remoção de DQO_T



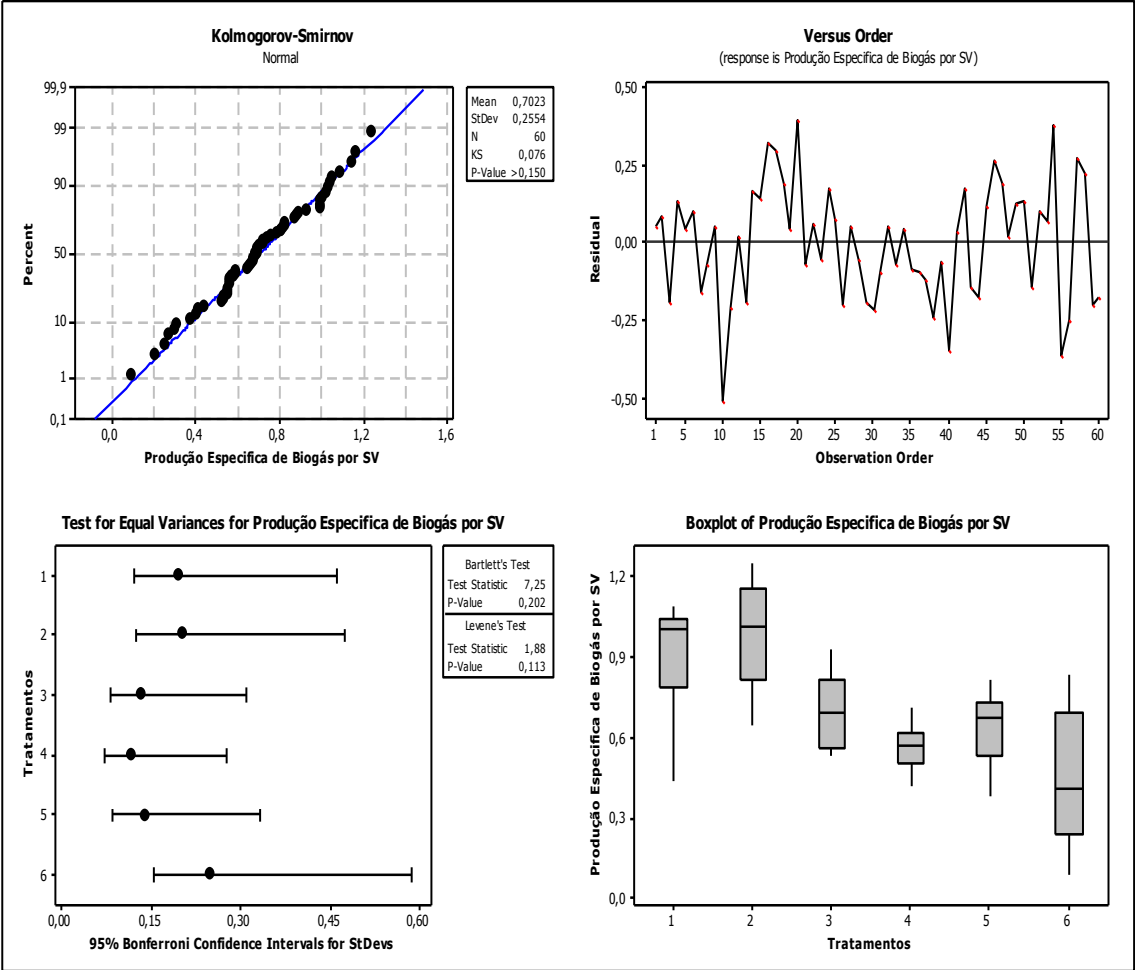
7. Remoção de DQOs



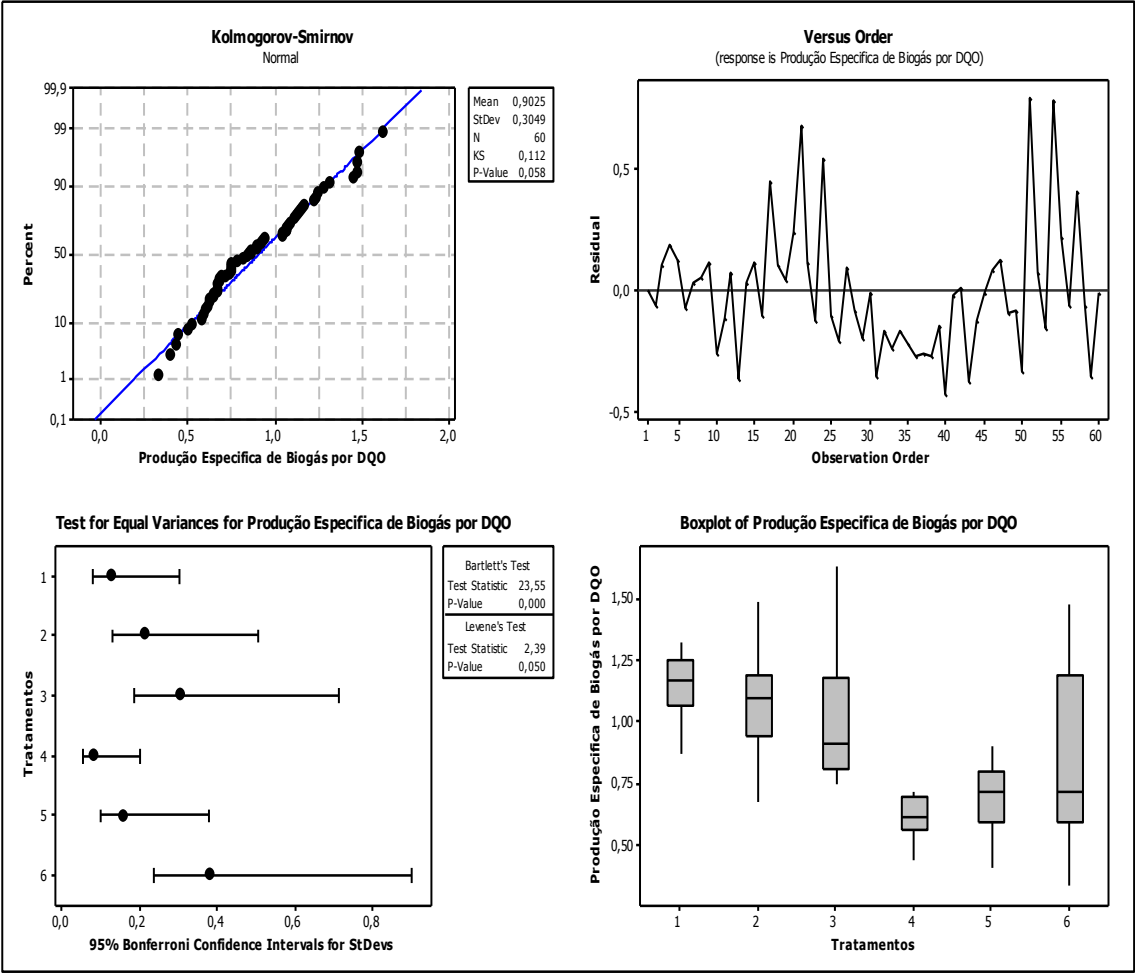
8. Biogás



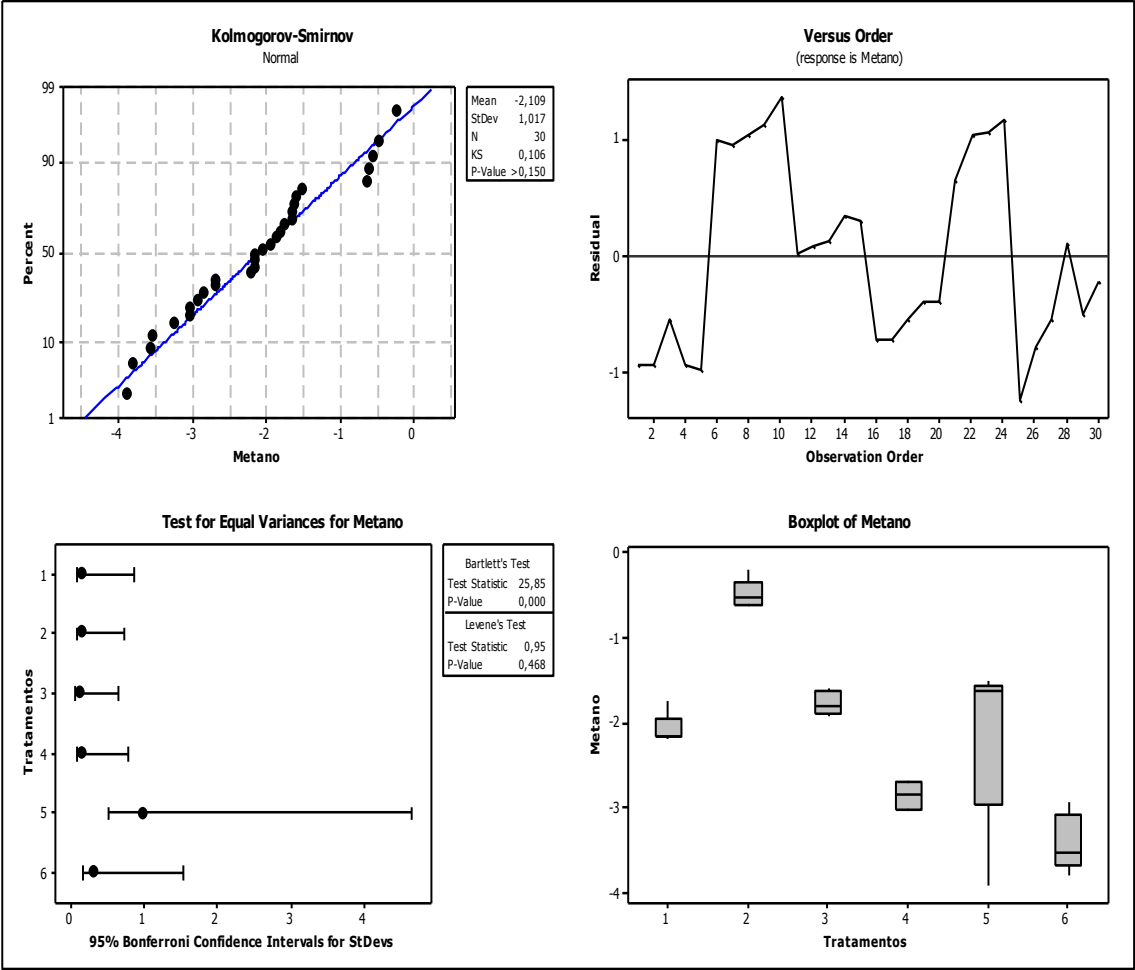
9. Produção Específica de Biogás por SV



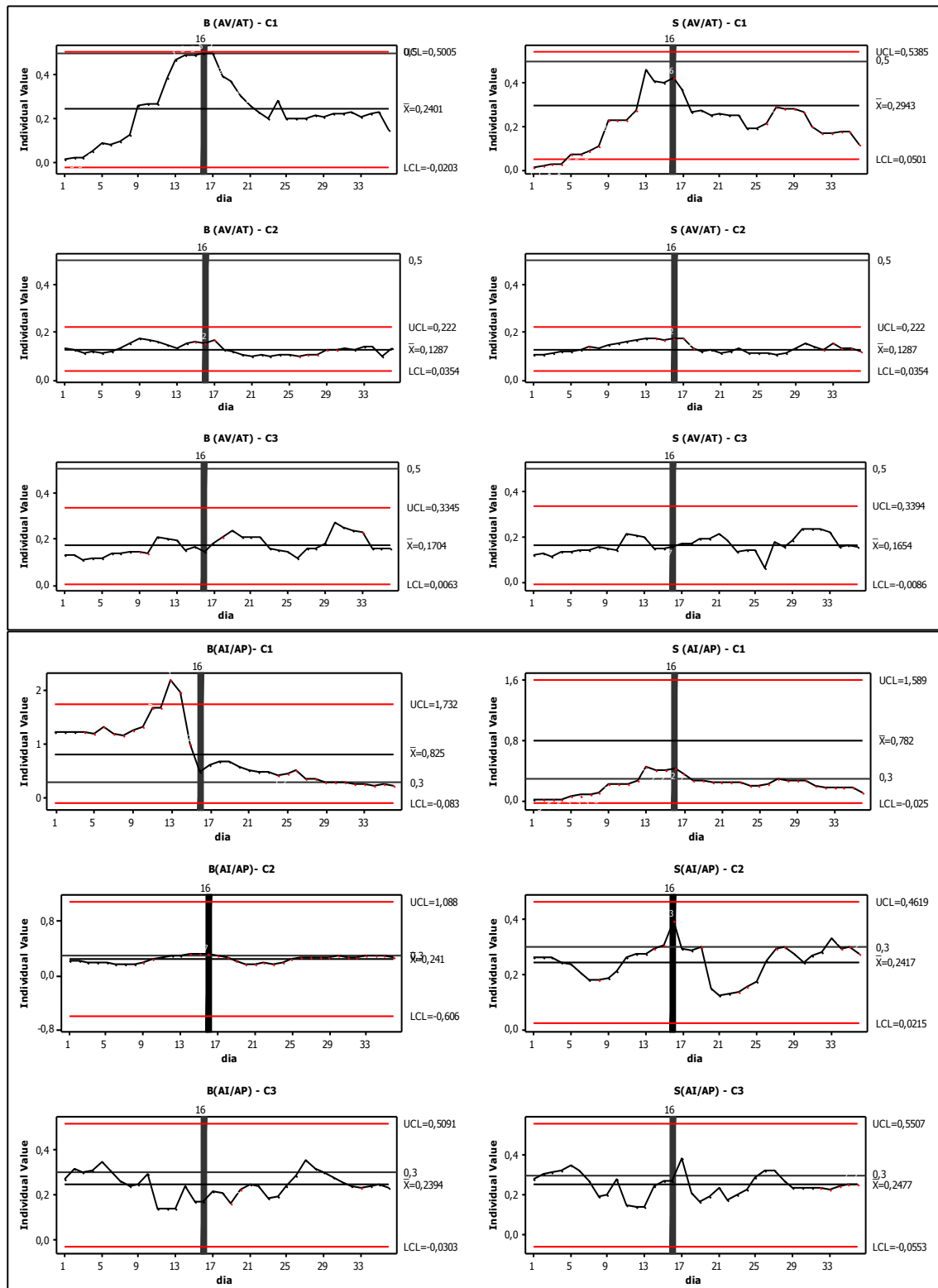
10. Produção Especifica de Biogás por DQO



11. Metano



APÊNDICE C – Relação AV/AT e Relação AI/AP - FASE II



*Início da coleta – décimo sexto dia.