

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL – SANEAMENTO AMBIENTAL**

**NAIANE COSTA LIMA**

**ANÁLISE DE TIPOS E CONCENTRAÇÕES DE INÓCULOS PARA  
POTENCIALIZAR A GERAÇÃO DE BIOGÁS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA  
DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO  
BAIRRO PLANALTO PICI, FORTALEZA – CE.**

**FORTALEZA  
2015**

**NAIANE COSTA LIMA**

**ANÁLISE DE TIPOS E CONCENTRAÇÕES DE INÓCULOS PARA  
POTENCIALIZAR A GERAÇÃO DE BIOGÁS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA  
DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES  
(FORSD) DO BAIRRO PICI, FORTALEZA – CE.**

**Dissertação submetida à Coordenação do  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil, da Universidade Federal do Ceará,  
como requisito parcial para obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Civil.**

**Área de concentração: Saneamento  
Ambiental**

**Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti**

**FORTALEZA  
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- L698a Lima, Naiane Costa.  
Análise de tipos e concentrações de inóculos para potencializar a geração de biogás na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares (FORSD) do Bairro Pici, Fortaleza – CE / Naiane Costa Lima. – 2015.  
139 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2015.  
Área de Concentração: Saneamento Ambiental.  
Orientação: Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti.

1. Saneamento. 2. Métodos de inoculação. 3. Matéria orgânica. 4. Biodigestão. I. Título.

**NAIANE COSTA LIMA**

**ANÁLISE DE TIPOS E CONCENTRAÇÕES DE INÓCULOS PARA  
POTENCIALIZAR A GERAÇÃO DE BIOGÁS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA  
DA FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO  
BAIRRO PLANALTO PICI, FORTALEZA – CE.**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil – Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 27/02/2015

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti  
Universidade Federal do Ceará-UFC  
(Orientador)



Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva  
Universidade Federal do Ceará-UFC  
(Examinador interno)



Prof. Dr. Aurélio Pêssoa Picanço  
Universidade Federal do Tocantins - UFT  
(Examinador externo)

Dedico esta, bem com todas as minhas demais conquistas, primeiramente a Deus, aos meus queridos pais e irmãos, colegas e amigos que incentivaram e ajudaram na concretização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer é, antes de tudo, reconhecer. Reconhecer que sem a ajuda recebida, esta conquista não estaria completa. Muitos fizeram parte deste trabalho, uns diretamente e outros indiretamente. Foi por meio do apoio, compreensão, auxílio na carreira acadêmica, ajuda nas pesquisas e nas dúvidas constantes, que nada me faz abster de dizer que este trabalho é fruto dos conhecimentos adquirido em sala e fora dela com auxílio de todos.

Agradeço primeiramente a Deus, pela minha existência e por me abençoar todos os dias com a vida, proporcionando as minhas vitórias, guiadas por meio de seus passos.

Aos meus amados pais, Célia e Edilson, que por meio da dedicação e esforço foram responsáveis por minha formação, sendo meus exemplos de determinação, nobreza e caráter.

Aos meus irmãos, Natália e Felipe, por poder contar com eles sempre que necessário, como os meus demais familiares.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ronaldo Stefanutti, que esteve presente em todo processo de construção deste trabalho, pelo conhecimento que pude agregar neste período e pelo tempo que foi dedicado a mim.

Aos meus queridos colegas e amigos do mestrado, Débora, Diego e Keyve, ao apoio em toda etapa do curso e no desenvolvimento da pesquisa, influenciando diretamente no resultado final deste trabalho.

Aos bolsistas de graduação, Gracy, Jessyca, Natan e Patrícia, pela participação e doação no desenvolver do trabalho.

Ao Labosan e seu grupo de pesquisadores, pelo espaço tão prontamente cedido e experiências trocadas.

Ao Ari, pelo auxílio com tratamento estatístico utilizado no trabalho.

Ao DEHA e UFC, pela contribuição em minha formação acadêmica.

A FUNCAP, pela concessão de bolsa de estudo como apoio financeiro ao desenvolvimento científica, e a FINEP, por fomentar e possibilitar a execução da pesquisa.

Aos professores da Banca Examinadora Prof. Dr. Fernando José Araújo e Prof. Dr. Aurélio Pessoa Picanço por ter aceitado o convite de avaliar esta dissertação.

Aos meus amigos, por fazerem parte do que eu sou e por estarem presentes nos momentos de dificuldade e nas minhas vitórias.

A todos que fizeram parte desta conquista de uma maneira ou de outra.

“Se, na verdade, não estou no mundo para simplesmente a ele me adaptar, mas para transformá-lo; se não é possível mudá-lo sem um certo sonho ou projeto de mundo, devo usar toda possibilidade que tenha para não apenas falar de minha utopia, mas participar de práticas com ela coerentes”.

(Paulo Freire)



## RESUMO

Considerando a importância da digestão anaeróbia para o reaproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos e a possibilidade de geração de energia por meio do biogás produzido, a pesquisa objetiva encontrar mecanismos que otimize o processo de digestão, por meio de testes com diferentes inóculos e relações Alimento/Microrganismos. O experimento consistiu na análise e avaliação de diferentes tipos de inóculos e relações Alimento/Microrganismos (A/M), a fim de otimizar a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, os quais foram coletados nas residências próximas a Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici. Na primeira fase da pesquisa, foram caracterizadas as propriedades físicas e químicas de quatro diferentes inóculos. No segundo momento, foi realizado o teste de atividade metanogênica específica. Após a avaliação do desempenho dos inóculos, foram selecionados dois inóculos e proposto duas relações A/M, para o desenvolvimento do teste de biodegradabilidade. Ocorreu também a caracterização física e química do substrato utilizado para a formação dos meios de reações para o teste de biodegradabilidade. Durante o teste de biodegradabilidade foram caracterizados os meios de reações antes e depois do teste. Ao avaliar a atividade metanogênica dos quatro inóculos testados, o inóculo oriundo da estação de tratamento de esgoto de uma indústria de cerveja (Inóculo 3), apresentou um maior desempenho com uma AME máximo de 0,80 gDQO/gSV·d, volume máximo de metano de 21,98 mL e 67,5% de metano presente no biogás, ainda em um período mais curto de 0,83 dia ao comparar com as outras amostras. Avaliando a atividade metanogênica e a produção de biogás no teste de biodegradabilidade, o inóculo 3 com uma relação A/M de 0,5 apresentou um melhor desempenho, com um volume máximo de metano de 29,31 mL, uma AME máxima de 0,47 gDQO/gSV·d e 58,5% de metano presente no biogás, em um período curto de 3,81 dias. Concluiu-se que um inóculo com características semelhantes ao inóculo 3, devem ser mais indicados para a digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares.

Palavras-chaves: inoculação; digestão anaeróbia; biogás;

## ABSTRACT

Considering the importance of anaerobic digestion for the reuse of the organic fraction of solid waste and the possibility of using the produced biogas power generation, the research aims to find ways to optimize the process of digestion, by testing with different inoculants and relations Food / Microorganisms. The experiment consisted in the analysis and evaluation of different types of inoculants and relations Food / Microorganisms (F / M) in order to optimize the anaerobic digestion of organic solid waste, which were collected from the households nearby the Federal University of Ceará - Campus Pici. In the first phase of the study, the chemical and physical properties of four different inoculum were characterized. In the second phase, we performed the specific methanogenic activity test. After evaluating the performance of inoculants two inoculations were selected and proposed two relations F / M, for the development of biodegradability test. There was also the physical and chemical characterization of the substrate used for the formation of reactions means for the degradation test. During the biodegradability test means were characterized reactions before and after the test. In assessing the methanogenic activity of the four tested inoculum, the inoculum derived from the sewage treatment plant of a brewing industry (inoculum 3) presented the highest performance with a maximum of 0.80 SMA g COD / SV • d, maximum volume Methane 21.98 ml and 67.5% methane present in the biogas, yet in a shorter period of 0.83 day compared to the other samples. Assessing the methanogenic activity and the production of biogas in the biodegradability test, the inoculum 3 with a F / M 0.5 outperformed, with a maximum volume of methane 29.31 mL, a maximum SMA 0, 47 g COD / SV • 58.5% of methane present in biogas, in a short period of 3.81 days. It was concluded that an inoculum with similar characteristics to the inoculum 3 are most suitable for anaerobic digestion of the organic fraction of solid waste.

Keywords: inoculation; anaerobic digestion; biogas;

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- Rotas metabólicas dos microrganismos no processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica. _____	26
FIGURA 2 - Etapas e fluxo dos processos desenvolvidos na pesquisa. _____	36
FIGURA 3- Registro fotográfico do procedimento realizado durante as coletas dos inóculos utilizados na pesquisa. _____	38
FIGURA 4 - Frascos preparados para realização do teste de AME. _____	42
FIGURA 5 - Lacrando e purgando com N <sub>2</sub> os frascos para realização do teste de AME. _____	43
FIGURA 6 - Leitor de pressão em mBar, utilizado no teste de AME. _____	44
FIGURA 7- cromatógrafo GC 17A, marca Shimadzu, acoplado a um detector de condutividade térmica (TCD). _____	44
FIGURA 8 - Localização geográfica da região, bairro Planalto Pici em Fortaleza - CE, no qual as frações orgânicas de resíduos sólidos domiciliares utilizados na pesquisa são provenientes. _____	45
FIGURA 9 – Registro fotográfico da realização da coleta e amostragem, que ocorreram durante a pesquisa. _____	46
FIGURA 10 – Registro fotográfico da atividade de trituração da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares realizada na pesquisa, tornando apto o material para ser utilizado como substrato no teste de biodegradabilidade e sua caracterização. _____	47
FIGURA 11- Representação do comportamento de uma função sigmoideal e seus componentes. _____	52
FIGURA 12- Gráfico de Tukey para comparação das médias do Peso Específico do Lodo (PEL) entre amostras dos inóculos. _____	58
FIGURA 13- Análise de Componente Principal dos atributos físico-químicos: diagrama de ordenação das amostras (scores) e formação de grupos de amostras semelhantes (a) e diagrama de ordenamento das variáveis (loadings) (b) levando-se em consideração as componentes principais 1 e 2. _____	61
FIGURA 14- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé). _____	69
FIGURA 15- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica para o Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico). _____	72
FIGURA 16- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria). _____	75
FIGURA 17- Box-plot com percentis de 25% e 75% para os parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade. _____	83
FIGURA 18- Box-plot com percentis de 25% e 75% para os parâmetros Sólidos Totais (ST) e Sólidos Totais Voláteis (STV) dos meios de reações caracterizados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade. _____	84

FIGURA 19- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Fósforo Total (PT) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade. ___	85
FIGURA 20- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade. _____	86
FIGURA 21- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Demanda Química de Oxigênio (DQO) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade. _____	87
FIGURA 22- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias para o parâmetro e Sólidos Totais Voláteis (STV) entre os meios de reações caracterizados antes do teste de biodegradabilidade. _____	89
FIGURA 23- Análise de Componente Principal dos atributos físico-químicos: diagrama de ordenação das amostras (scores) e formação de grupos de amostras semelhantes (a) e diagrama de ordenamento das variáveis (loadings) (b) levando-se em consideração os componentes _____	94
FIGURA 24- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	97
FIGURA 25- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	100
FIGURA 26- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	103
FIGURA 27- - Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	106

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1— Resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) para caracterização para inóculos estudados _____	53
TABELA 2 – Resultados dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), relação STV/ST e Teor de Umidade para os inóculos estudados. _____	54
TABELA 3 – Resultados dos parâmetros Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) e Fósforo Total (PT) para os inóculos. _____	55
TABELA 4- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização dos inóculos, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos. _____	56
TABELA 5- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias do Peso Específico do Lodo (PEL) entre amostras dos inóculos. _____	57
TABELA 6- Resumo da análise de componentes principais para as amostras de inóculos analisados. _____	58
TABELA 7 – Análise dos componentes principais para cada inóculo. _____	59
TABELA 8– Análise dos componentes principais para cada variável analisa para amostras de inóculos. _____	59
TABELA 9 - Características físicas e químicas do substrato (fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares – FORSD) utilizado na pesquisa. _____	65
TABELA 10 – Levantamento dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Teor de Umidade (TU) para as amostras de Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão (FORSUP) utilizados na literatura. _____	65
TABELA 11- Resultados do teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) para os inóculos utilizados. _____	66
TABELA 12- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Específica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé). _	67
TABELA 13- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé). _____	70
TABELA 14- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé). _____	71
TABELA 15- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Específica do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico). _____	71
TABELA 16- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico). _____	73
TABELA 17- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de	

metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico). _____	74
TABELA 18- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Especifica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria). _____	74
TABELA 19- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria). _____	76
TABELA 20- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria). _____	77
TABELA 21- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Especifica do Inóculo 4 (Lixiviado coletado no ASMOC). _____	77
TABELA 22 – Resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT), Ácidos Graxos Voláteis (AGV) e relação AGV/ALcT para os meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade. _____	78
TABELA 23 – Resultados para os parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e relação STV/ST dos meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade. _____	79
TABELA 24 – Resultados dos parâmetros Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK), Fósforo Total (PT), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e relação DQO:N:P dos meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade. _____	80
TABELA 25 – Comparação entre os resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) dos meios de reações analisados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade. _____	80
TABELA 26 – Comparação entre os resultados dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a eficiência de remoção, para os meios de reações analisados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade. _____	81
TABELA 27- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos realizados na caracterização dos meios de reações antes do teste de biodegradabilidade, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos. _____	88
TABELA 28- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias para o parâmetro Sólidos Totais Voláteis (STV) entre amostras dos meios de reações caracterizados antes do teste de biodegradabilidade. _____	88
TABELA 29- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos realizados na caracterização dos meios de reações após o teste de biodegradabilidade, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos. _____	90
TABELA 30- Resumo da análise de componentes principais para os meios de reações analisados antes e após o teste de biodegradabilidade. _____	90

TABELA 31- Análise dos componentes principais para cada meio de reação analisado antes e após o teste de biodegradabilidade. _____	91
TABELA 32- Análise dos componentes principais para cada variável analisada para amostras de inóculos. _____	92
TABELA 33 - Resultados do teste de biodegradabilidade para os meios de reações preparados na pesquisa. _____	95
TABELA 34- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 0,5 durante o teste de biodegradabilidade. _____	96
TABELA 35- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	97
TABELA 36- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	98
TABELA 37- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 1,0 durante o teste de biodegradabilidade. _____	99
TABELA 38- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	101
TABELA 39- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	102
TABELA 40- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 0,5 durante o teste de biodegradabilidade. _____	102
TABELA 41- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	104
TABELA 42- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 3	

(Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5. _____	105
TABELA 43- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 1,0 durante o teste de biodegradabilidade. _____	105
TABELA 44- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão o, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	107
TABELA 45-Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0. _____	108



## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- Levantamento na literatura de parâmetros experimentais adotados no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos. _____	31
QUADRO 2- Levantamento na literatura referente ao poder calorífico de vários combustíveis e suas respectivas emissões em CO <sub>2</sub> equivalente. _____	35
QUADRO 3 – Denominação e características dos inóculos selecionados nesta pesquisa para utilização no teste de atividade metanogênica específica e biodegradabilidade, quanto ao processo e local de origem. _____	37
QUADRO 4 - Parâmetros físicos e químicos realizados para caracterização dos inóculos utilizados no teste de atividade metanogênica específica. _____	38
QUADRO 5- Solução padrão de macronutrientes a ser adicionado nos frascos de reações para o teste de atividade metanogênica específica. _____	39
QUADRO 6 - Solução padrão de micronutrientes a ser adicionado nos frascos de reações para o teste de atividade metanogênica específica _____	39
QUADRO 7 - Parâmetros físicos e químicos realizados para caracterização da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares, a ser utilizado na pesquisa como substrato no teste de biodegradabilidade. _____	47
QUADRO 8- Funções sigmoidais de crescimento utilizadas para avaliação da produção de metano na pesquisa e suas características. _____	51
QUADRO 9 – Proposta de elaboração de uma Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão (FORSUP), referente a % em massa de cada elemento e categoria sugerido, segundo Pinto (2000). _____	63

## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANOVA- Análise de variância (teste de comparação de médias)

Alc.T – Alcalinidade Total

AGV – Ácidos Graxos Voláteis

AME – Atividade Metanogênica Específica

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

DEHA – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FID – Detector de ionização de chama

FORS - Fração Orgânica de Resíduos Sólidos

FORSO - Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domiciliares

FORSU – Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos

IDHM-B - Índice de Desenvolvimento Humano Municipal por Bairro

IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

LABOSAN – Laboratório de Saneamento

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

P.A. – Pureza Analítica

PC – Componente Principal

PCA – Análise por Componentes Principais

PCI – Poder Calorífico Inferior

pH – Potencial Hidrogeniônico

PEL – Peso Específico do Lodo

PMF - Prefeitura Municipal de Fortaleza.

PNRS - Política Nacional de Resíduos sólidos

PT – Fosforo Total

RS – Resíduos Sólidos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SER III - Secretaria Executiva Regional III

ST – Sólidos Totais

STV – Sólidos Totais Voláteis

TCD - Detector de Condutividade Térmica

Td – Tempo de Detenção

TU – Teor de Umidade

UASB – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>21</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
<b>2.1. Objetivo geral</b>	<b>23</b>
<b>2.2. Objetivos específicos</b>	<b>23</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Digestão anaeróbia – Aspectos Gerais:</b>	<b>24</b>
3.1.1. Fundamentos da digestão anaeróbia	24
3.1.2. Fatores intervenientes no processo de digestão anaeróbia	27
<b>3.2. Digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos:</b>	<b>28</b>
3.2.1. Panorâmica e evolução histórica:	28
3.2.2. Inoculação de sistemas anaeróbios aplicados à fração orgânica de resíduos sólidos da fração orgânica de resíduos sólidos:	30
3.2.3. Testes de atividade metanogênica específica (AME).	32
3.2.4. Teste de Biodegradabilidade.	34
<b>3.3. Aproveitamento energético do Biogás.</b>	<b>34</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
<b>4.1. Inóculos</b>	<b>37</b>
<b>4.2. Teste de Atividade Metanogênica Específica</b>	<b>39</b>
<b>4.3. Substrato</b>	<b>45</b>
<b>4.4. Teste de Biodegradabilidade</b>	<b>48</b>
<b>4.5. Análise estatística dos dados</b>	<b>49</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>53</b>
<b>5.1. Caracterização físico-química dos inóculos</b>	<b>53</b>
5.1.1. pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV).	53
5.1.2. Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Teor de Umidade (TU) e Peso Específico do Lodo (PEL).	54
5.1.3. Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK), Fósforo Total (PT) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).	55
5.1.4. Aplicando ANOVA e Tukey.	56
5.1.5. Análise por Componentes Principais (PCA).	58
<b>5.2. Caracterização físico-química do substrato – FORSD</b>	<b>62</b>
<b>5.3. Teste de atividade metanogênica específica – AME</b>	<b>66</b>
5.3.1. Aplicando regressão não-linear – Função Sigmoidal.	67
<b>5.4. Teste de biodegradabilidade</b>	<b>78</b>

5.4.1.	Caracterização dos meios de reações no início do teste: _____	78
5.4.2.	Caracterização dos meios de reações no final do teste: _____	80
5.4.3.	Interpretando os resultados por meio do diagrama de caixas ou box-plot. 82	
5.4.4.	Aplicando ANOVA e TUKEY. _____	87
5.4.5.	Análise por Componentes Principais (PCA). _____	90
5.4.6.	Atividade metanogênica e produção de biogás a partir dos meios de reações: 95	
5.4.7.	Aplicando regressão não-linear – Função Sigmoidal. _____	96
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> _____	<b>109</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> _____	<b>110</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>111</b>
	<b>APÊNDICES</b> _____	<b>117</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Designa-se de Resíduo Sólido Urbano (RSU), o material proveniente de atividade humana, tanto oriunda de domicílios, como da limpeza urbana. Visto o desenvolvimento urbano, o crescimento demográfico acelerado e o aumento da renda per capita no Brasil, houve um aumento crescente da geração de RSU. Estima-se que a população mundial gere 1,3 bilhões de toneladas de lixo por ano, ou seja, 1,2 Kg por dia para cada habitante (HOORNWEG E BHADA-TATA, 2012).

Encontrar o destino adequado dos RS é uma questão enfrentada mundialmente, tornando-se um problema sanitário, ao serem acondicionados, coletados e dispostos inadequadamente. No Brasil, a maioria dos resíduos é disposta de maneira inadequada, como a céu aberto, em lixões e próximo aos corpos hídricos.

Conhecer as características dos resíduos sólidos dispostos por uma comunidade torna-se uma ferramenta imprescindível, auxiliando na tomada de decisão perante a coleta, tratamento e disposição final mais adequada para cada resíduo. A maior parcela dos RSU gerado no Brasil corresponde à fração orgânica dos resíduos sólidos (FORS), sendo constituindo tipicamente por sobras de comida, papéis, trapos, madeira e detritos de podas e jardins.

A fração orgânica de resíduos sólidos está suscetível ao reaproveitamento por meio dos processos de compostagem, vermicompostagem e digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia é utilizada no processo de tratamento de diversos substratos, preferencialmente com elevado teor matéria orgânica. Esse mecanismo tem-se disseminado nos últimos anos, com o intuito de reaproveitamento da matéria orgânica provenientes dos resíduos sólidos domiciliares (BARCELOS, 2009).

A digestão anaeróbia consiste na bioestabilização da matéria orgânica por microrganismos, na ausência de oxigênio, obtendo como principal subproduto metano e gás carbônico. O estudo e aplicação da digestão anaeróbia são extremamente importantes, pois na medida em que os resíduos orgânicos são degradados, geram subprodutos como o metano, sendo uma fonte de combustível, além da consequente destinação ambientalmente adequada.

A digestão anaeróbia pode-se ser subdividida em uma sucessão de quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. É essencial avaliar o funcionamento dessas etapas para se verificar um possível efeito inibitório de algum fator presente em determinada fase da digestão. Diversos fatores podem influenciar este

processo, como a temperatura, a carga orgânica aplicada, a presença de materiais de natureza tóxica, entre outros (CHENICHARO, 2007).

A grande desvantagem do processo de digestão anaeróbia em biodigestores consiste no elevado tempo para a estabilização da matéria orgânica. Entretanto, atualmente são evidenciados artifícios para diminuir o tempo e aperfeiçoar o processo de bioestabilização dessa matéria, destacando-se a adição inóculos.

A utilização de inóculos propicia um equilíbrio na relação entre o Carbono e Nitrogênio, o aumento da população de microrganismos, a incorporação de agentes de tamponamentos, a elevação do percentual de umidade, além de melhorar a rentabilidade da produção de biogás.

Considerando a importância da digestão anaeróbia para o reaproveitamento da fração orgânica dos resíduos sólidos e a possibilidade de geração de energia por meio do biogás produzido, a pesquisa objetiva encontrar mecanismos que otimize o processo de digestão, por meio de testes com diferentes inóculos e relações Alimentos/Microrganismos. A fração orgânica dos resíduos sólidos foi coletada no bairro Planalto Pici, Fortaleza – CE. Sendo realizados análises e testes no LABOSAN (Laboratório de Saneamento) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Avaliar diferentes inóculos e relações Alimento/Microrganismos (A/M) no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos domiciliares potencializando a geração de biogás.

### 2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar diferentes inóculos e fração orgânica de resíduos sólido domiciliares provindo de uma comunidade;
- Determinar o inóculo adequado para atuar na digestão dos resíduos sólidos domiciliares;
- Avaliar a melhor relação A/M no processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos domiciliares e o impacto na produção de biogás;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Digestão anaeróbia – Aspectos Gerais:

##### 3.1.1. Fundamentos da digestão anaeróbia

Os ciclos biogeoquímicos são responsáveis pela manutenção de diversos elementos químicos na natureza, disponibilizando de forma natural esses elementos do meio ambiente para os organismos e dos organismos para o meio ambiente. A partir do fluxo da matéria, a matéria orgânica pode ser absorvida pelos microrganismos decompositores que disponibilizam no solo sais minerais e outros elementos, os quais podem ser aproveitados por outros organismos (ROSA; MESSIAS; AMBROZINI, 2003).

A digestão da matéria orgânica pode ocorrer na presença ou ausência de oxigênio, sendo classificados como digestão aeróbia ou anaeróbia. As etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia são muito mais complexas, quando comparada a digestão aeróbia, devido as diferentes rotas metabólicas disponíveis para comunidade anaeróbia (CHERNICARO, 2007).

Segundo Leite *et al.* (2014), a digestão anaeróbia de resíduos orgânicos consiste em “um processo microbiano de flora mista, na qual a matéria orgânica, em ausência de oxigênio molecular, é convertida a gases que são constituídos predominantemente de metano e dióxido de carbono”

Estima-se que a digestão anaeróbia seja responsável pela mineralização completa de 5 a 10% de toda a matéria orgânica disponível no planeta, gerando como subproduto o metano (CHERNICARO, 2007).

Participam do processo de digestão anaeróbia três grupos de microrganismos importantes, com características fisiológicas distintas: bactérias fermentativas hidrolíticas e acidogênicas, bactérias acetogênicas e arqueas metanogênicas. O processo pode ser subdividido em quatro etapas sequenciais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Alguns autores dividem o processo em três etapas: a primeira etapa, as proteínas são convertidas em aminoácidos, as gorduras em ácidos orgânicos de cadeia longa e os carboidratos em açúcares simples; a segunda etapa, os ácidos orgânicos e outros subprodutos gerados na etapa anterior são



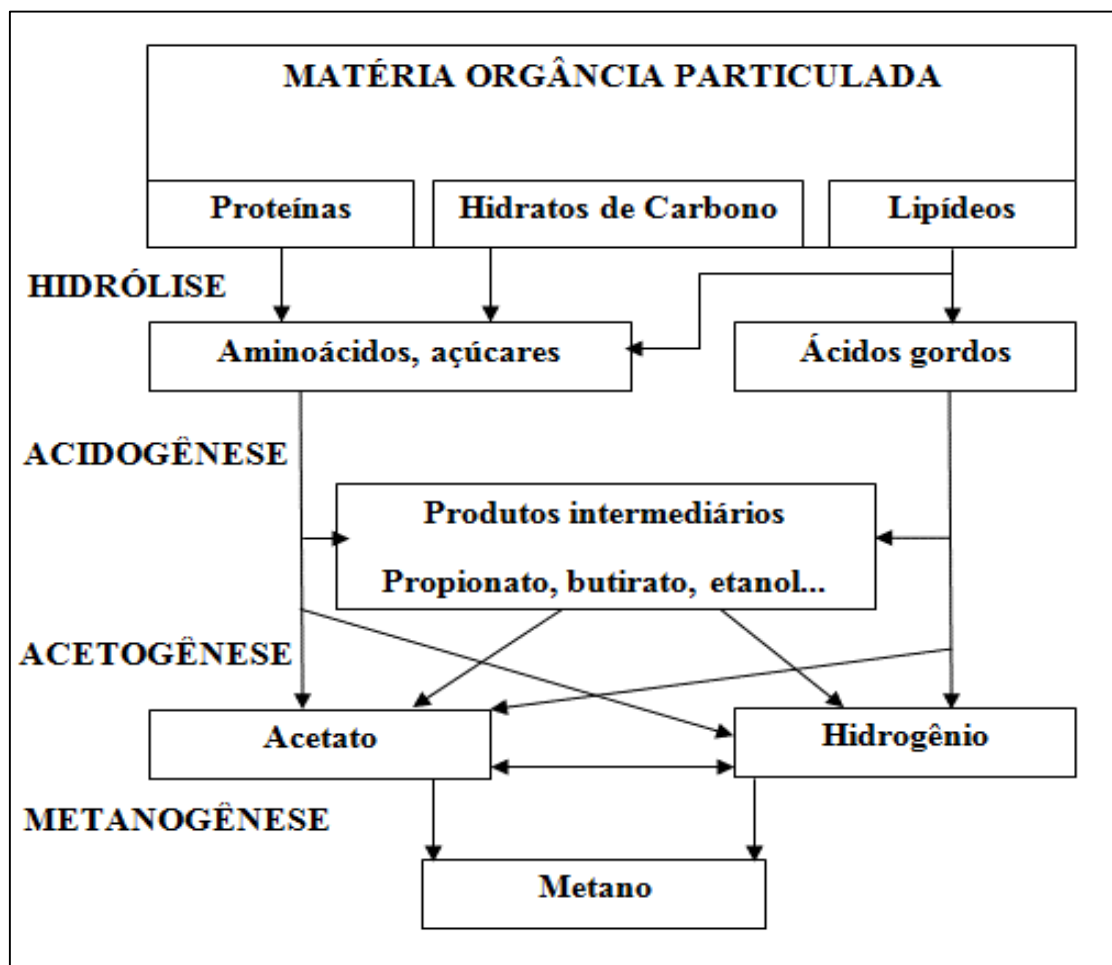
metabolizados produzindo ácido acético; na terceira etapa, os ácidos são metabolizados gerando como subprodutos metano e gás carbônico (GONÇALVES, 2010).

Chernicaró (2007) defini as quatro etapas da digestão anaeróbia da seguinte maneira (Figura 1):

- **Hidrólise:** Consiste na hidrólise de materiais particulados complexos, polímeros, por meio da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolítica. Os polímeros são transformados em materiais dissolvidos mais simples, moléculas menores, capazes de atravessar as paredes celulares desse grupo de bactéria. Dentre os gêneros de bactérias que participam do processo, destacam-se: *Clostridium*, *Micrococcus*, *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Fusobacterium*, *Selemonas*, *Streptococos*, *Proteus*, *Peptococcus*, *Bacillus*, *Acetivirio*, *Eubacterium* e *Staphylococcus*.
- **Acidogênese:** Os subprodutos solúveis provenientes da hidrólise são metabolizados, por meio do metabolismo fermentativo no interior das células, pelas bactérias fermentativas acidogênicas. O processo gera produtos mais simples como, álcoois, cetonas, dióxido de carbono, hidrogênio e em maior quantidade ácidos orgânicos. Dentre os gêneros de bactérias que participam do processo, destacam-se: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Bacillus*, *Micrococcus*, *Eubacterium* e *Escheruchia*.
- **Acetogênese:** Consiste na oxidação de ácidos orgânicos, como propionato e butirato, por bactérias sintróficas acetogênicas, em substratos (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono) apropriados para os microrganismos metanogênicos. Dentre os gêneros de bactérias que participam do processo, destacam-se: *Syntrophobacter* e *Syntriphomonas*.
- **Metanogênese:** Etapa final do processo anaeróbio de conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, sendo responsáveis por esse processo dois grupos de arqueas metanogênicas. As metanogênicas acetocláticas usam acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico e metano, são microrganismos predominantes no processo e responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano. As metanogênicas hidrogenotróficas usam o hidrogênio e gás carbônico para a

produção do metano, gerando maior liberação de energia. Dentre os gêneros de bactérias que participam do processo, destacam-se: *Methanosarcina* e *Methanosaeta* (metanogênicas acetoclásticas); *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanobrevibacter*, *Methanoculleus* e *Methanocorpusculum* (metanogênicas hidrogenotróficas).

FIGURA 1- Rotas metabólicas dos microrganismos no processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: ADAPTADO DE ALVES, 1998, *apud*, GUJER E ZEHNDER, 1983.

A fase metanogênica da digestão anaeróbia é considerada a fase crítica, devido à sensibilidade maior dos microrganismos metanogênicos às condições adversas do meio, em relação aos microrganismos hidrolíticos ou acidogênicos. Contudo, a etapa acidogênica será limitante do processo, quando o material degradado não for facilmente hidrolisável. Portanto, na digestão anaeróbia requer um rigoroso monitoramento nas

condições do meio, devido a necessidade que ocorram da melhor forma as interações entre os microrganismos fermentativos e metanogênicos (MENESES, 2011).

### 3.1.2. Fatores intervenientes no processo de digestão anaeróbia

O sucesso da digestão anaeróbia se fundamenta principalmente em uma biomassa adaptada, com elevada atividade microbiológica e resistente a variações de temperatura. Várias são as condições que interferem no processo de digestão anaeróbia, como principais fatores lista-se (CARNEIRO, 2009; GONÇALVES, 2010, MOREIRA, 2011; MENESES, 2011):

- pH e Alcalinidade: Variações de pH podem causar alterações significativas nos consórcios de microrganismos, visto que influenciam na sua taxa de crescimento, metabolismos, reações de sínteses, morfologia e estrutura. A maioria das bactérias não são susceptíveis a pH acima de 9,5 ou abaixo de 4,0, possuindo uma faixa ótima entre 6,5 e 7,5 para o crescimento bacteriano. Devido ao metabolismo lento das bactérias metanogênicas, essas são mais susceptíveis a variações de pH, valores abaixo de 6,3 e maior que 7,3 resultam na diminuição da atividade metanogênica. Já as bactérias acidogênicas são menos sensíveis a variações de pH. Acarretando em situações de pH baixo, uma atividade acidogênica superior das metanogênicas, causando o fenômeno conhecido por azedamento. A alcalinidade é responsável pela capacidade tampão dos sistemas, não permitindo variações bruscas de pH, sendo necessário o monitoramento e estabilidade do processo.

- Temperatura: A temperatura pode influenciar no metabolismo dos microrganismos. Os microrganismos anaeróbios são mais sensíveis à variação de temperaturas do que os aeróbios, mais propriamente as bactérias metanogênicas. Cada bactéria possui uma temperatura ótima, a qual permite uma maior velocidade de crescimento, em condições ideais. Existem três faixas de temperaturas que são trabalhadas: mesófila (20° - 45°C); termófila (>45°C); psicrófila (<20°C). A digestão anaeróbia acontece comumente nas faixas mesófila, com temperatura ótima em torno de 35°C, e nas faixas termófilas, com temperatura ótima em torno de 55°C.

- **Presença de nutrientes:** Os nutrientes são essenciais para todo processo biológico. Os nutrientes que estão principalmente envolvidos são nitrogênio (N) e o fósforo (P), além do enxofre (S). Esses são denominados macronutrientes, sendo necessários em maior quantidade. A relação de N e P entre a matéria orgânica presente (expressa em DQO – Demanda Química de Oxigênio), admitida pela maioria dos autores, necessário para a demanda da atividade anaeróbia é 350:7:1 (DQO:N:P). Os outros nutrientes também necessários, só que em menores quantidades, são denominados de micronutrientes. Como micronutrientes principais para o processo anaeróbio, pode-se citar o ferro, cobalto, cobre, níquel, zinco, selênio, manganês e molibdênio, além de cátions ( $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^{+1}$ ,  $K^{+1}$ ,  $Fe^{+2}$ ) e ânions ( $Cl^{-}$ ,  $SO_4^{-2}$ ).
- **Ausência de materiais tóxicos:** A otimização do processo anaeróbio depende da manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos, assim acarretando na eliminação de componentes tóxicos. As bactérias metanogênicas são facilmente inibidas por toxinas. Algumas substâncias químicas, mesmo em pequenas concentrações, podem inibir o processo, como os metais pesados e substâncias organo-clorados. O sulfeto, amônia e oxigênio dissolvido em algumas de suas formas em grandes quantidades podem ser tóxicos ao processo.

### 3.2. **Digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos:**

#### 3.2.1. Panorâmica e evolução histórica:

A digestão anaeróbia é uma tecnologia bastante antiga, o biogás era utilizado para aquecer a água utilizada nos banhos na Assíria, no século 10 A.C, e na Pérsia, no século XVI. No século XVII, o metano era conhecido como “ar inflamável”, Jan Baptista Van Helmont relacionou a produção de gases inflamáveis com o decaimento da matéria orgânica (HENRIQUES, 2004).

No século XIX, a tecnologia da digestão anaeróbia começou a ser industrializada. Na Índia, em 1859, foi confeccionada a primeira planta de digestão anaeróbia. Na França, em 1860, foi construído um tanque de alvenaria para liquefazer os resíduos do esgoto doméstico. Na Inglaterra, em 1890, foi projetado um tanque

séptico, o qual o gás produzido era utilizado para iluminação pública. Na Alemanha, em 1920, foi desenvolvido um tanque biodigestor, sendo denominado de tanque Imhoff (PINTO, 2006).

O interesse do mercado na produção de metano decaiu com o baixo custo do carvão mineral e abundância do petróleo. Na Segunda Guerra Mundial, a tecnologia anaeróbia voltou a se difundir, devido ao déficit dos combustíveis fósseis. Contudo, após a guerra o gás metano foi esquecido novamente. Enquanto, os países desenvolvidos não tinham interesse pela digestão anaeróbia, os países em desenvolvimento, como a Índia e China, utilizavam a tecnologia para produção de energia e tratamento de seus resíduos (MENESES, 2011).

A partir de 1960, pesquisas científicas foram intensificadas com o intuito de recuperação de energia e redução da massa de resíduos sólidos orgânicos. Nos últimos anos, plantas pilotos e em escala real vêm sendo instaladas na Europa. O interesse por essa tecnologia recentemente pela Europa se deve aos altos preços da energia e restrições ambientais (BARCELOS, 2009).

Na Europa há uma predominância de sistemas digestão anaeróbios conhecidos denominados como individuais, no qual são instalados sistemas de tratamentos dos resíduos no mesmo local da produção, sendo utilizados principalmente para resíduos oriundos da agropecuária. Atualmente, Alemanha é o país com maior quantidade dessas unidades, apresentando mais de 3000 unidades. Sendo bastante utilizados também na Áustria, Portugal, Suíça, Itália e Dinamarca (MOREIRA, 2011).

A digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos possui uma boa relação custo-benefício, quando comparados com outras tecnologias de tratamento. Barcelos (2009), lista as vantagens desse tipo de tratamento:

- Aumento da vida útil dos aterros sanitários;
- Retirada da fração orgânica dos RSU que é a matéria que resulta em odores desagradáveis e geração de lixiviados de alta carga nos aterros;
- Minimização da emissão de gases que aumento o efeito estufa;
- Possibilidade de coleta de todo o biogás gerado (em aterros o índice de recuperação é de 30 a 40%);
- Geração de produtos valorizáveis: biogás (energia e calor) e composto;
- Poucos requisitos nutricionais para a fase de fermentação;
- Baixo ou nenhum gasto de energia;

- Aplicação de elevadas cargas orgânicas;
- Não necessita de uma área grande para ser implementado;

Barcelos (2009), também ressalta as desvantagens do processo anaeróbio de digestão dos resíduos sólidos orgânicos, como principais têm-se o longo tempo de bioestabilização do material e a sensibilidade do processo a mudanças das condições ambientais.

### 3.2.2. Inoculação de sistemas anaeróbios aplicados à fração orgânica de resíduos sólidos da fração orgânica de resíduos sólidos:

O processo de bioigestão anaeróbia dos resíduos sólidos leva um grande período para a sua estabilização, diversos fatores ainda podem dificultar o processo de degradação como a presença de compostos poliméricos de difícil degradação (celulose e lignina). Em razão disso, buscam-se alternativas para acelerar e otimizar o processo como pre e pós-tratamentos (PINTO, 2006).

A inoculação visa à redução do tempo de estabilização anaeróbia dos resíduos, por meio do tratamento combinado com vários resíduos com características complementares, em uma única instalação. A utilização de distintos resíduos propicia o aumento do efeito sinérgico dos microrganismos participantes da digestão anaeróbia (SANTOS, 2010).

Implementar o processo de inoculação permitem aumentar o rendimento no tratamento de resíduos, suplementar o meio de digestão com nutrientes ausentes nos substratos presentes, equilibrar as cargas orgânicas, melhorar a umidade existente no reator, havendo como consequência o aumento da produção do biogás (MENESES, 2011).

Pinto (2006) lista alguns benefícios da utilização de inóculo na digestão anaeróbia:

- Fornecer o conteúdo de umidade adequado;
- Propiciar o equilíbrio da relação Carbono/Nitrogênio;
- Incorporar agentes tamponantes;
- Redução significativa do tempo de retenção de sólidos;
- Melhoria na produção de biogás em termos quantitativos e qualitativos.

Na literatura são normalmente utilizados como co-digestor lodo de esgoto digerido, lodo de UASB, estrume, resíduo digerido e lixiviado. Para garantir a eficiência

do processo, torna-se necessário o equilíbrio da relação substrato e inóculo. A quantidade de inóculo adicionado dependerá da sua atividade metanogênica e taxa de produção inicial do substrato, correspondente a quantidade de fração facilmente degradável presente (BARCELOS, 2009).

Diversas pesquisas foram desenvolvidas para avaliar a eficiência da inoculação na digestão anaeróbia de resíduos sólidos para a remoção de matéria orgânica e aumento na produção de biogás. O Quadro 1 traz dados sobre estudos de digestão anaeróbia.

QUADRO 1- Levantamento na literatura de parâmetros experimentais adotados no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos.

Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (°C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Cechi <i>et al.</i> (1993)	FORSU	-	20	37 – 55	13,5 – 14,5	24 – 34 (STV)
Mtz. Viturtia <i>et al.</i> (1995)	Frutas e verduras	Esterco bovino e suíno	6	35	4,5 – 18	27 – 72 (STV)
Torres Castillo <i>et al.</i> (1995)	Cevada	Esterco bovino e suíno	26 – 30	25 e 35	110 – 240	45 – 86 (STV)
Del Borghi <i>et al.</i> (1999)	Resíduos de cozinha triturados	Lodo primário e secundário	1 – 4	55	12	56 – 63 (STV)
Pavan <i>et al.</i> (1999a)	Frutas e verduras	-	8	35 – 56	11 – 12	67 – 84 (STV)
Pavan <i>et al.</i> (1999b)	FORSU	-	10 – 25	55 – 56	11 – 12	37 – 82 (STV)
Leite <i>et al.</i> (2001)	FORSU	Rúmen bovino	18 – 19	Não informado	365	86, 81, 73, 70 (DQO)
Stroot <i>et al.</i> (2001)	FORSU + lodo primário + lodo ativado descartado	Esterco bovino e lodo de digestor anaeróbio	8 – 21	37	4 - 20	43 - 68 (STV)
Xu <i>et al.</i>	Alimentos	Lodo de	10	35	16	60 (STV)

(2002)		digestor e de reator UASB				
Mace <i>et al.</i> (2003)	FORSU	Lodo de digestor anaeróbio industrial mesofílico	11	35	8 - 15	43 - 45 (STV)
Wang <i>et al.</i> (2003)	Alimentos	Lodo de digestor e de reator UASB	10	35	36	78 (STV)
Bouallagui <i>et al.</i> (2004b)	Frutas e verduras	Lodo de digestor	4, 6, 8 e 10	20, 35, 55	20	54 - 87 (STV)
Fernández <i>et al.</i> (2005)	FORSU	Gordura animal e vegetal	28	37	17	73 (STV)
Hartmann e Ahring (2005)	FORSU	Esterco bovino	25	55	14 - 18	69 - 74 (STV)
Carneiro (2005)	FORSU	Lixiviado + lodo de esgoto	25	35	95	59 - 65 (STV)

Fonte: BARCELOS, 2009.

FORSU: Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos; Td: Tempo de detenção; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

Estudos mostram que a relação de 5 a 20 % de sólidos totais de lodo de esgoto sanitário presente na digestão anaeróbia, promove a conversão de matéria orgânica em biogás a uma taxa de 40 a 50 %. A adição de 20 % do peso do inóculo ao substrato pode promover o alcance do limite máximo da taxa de produção do metano (PICANÇO, 2004).

### 3.2.3. Testes de atividade metanogênica específica (AME).

A otimização de qualquer processo biológico se baseia no monitoramento da atividade microbiológica. Notadamente, devido ao grau de complexidade das rotas metabólicas e a alta sensibilidade dos microrganismos, tornou-se essencial à avaliação da atividade desse grupo, principalmente das arqueas metanogênicas. Ao longo do tempo, foram propostas diversas metodologias para avaliação da atividade dos microrganismos anaeróbios, a partir da caracterização da atividade metanogênica específica (AME).



Chernicaró (2007) defini atividade metanogênica específica como a capacidade máxima de produção de metano por um consórcio de microrganismos anaeróbios. Sendo realizado o teste em condições controladas de laboratório, para viabilizar a atividade bioquímica máxima de conversão de substratos orgânicos a biogás, permitindo assim a caracterização da AME.

A análise do teste de AME permite estimar a carga orgânica máxima que pode ser aplicado a cada reator, avaliar o comportamento da biomassa sob efeito de compostos inibidores, estabelecer o grau de deგრabilidade de diversos substratos, avaliar parâmetros cinéticos e dentre outros (STEIL, 2007).

Na literatura não existe um consenso quanto à metodologia do teste de AME, variando desde o método de incubação do inóculo a quantificação do metano produzido. A falta de padronização internacional do teste de AME dificulta a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias, criando na verdade uma comparação mais relativa dos resultados (SENA, 2011).

Dentre as condições do teste, torna-se importante destacar na sua realização que o substrato utilizado deve dar suporte apenas a atividade metabólica dos microrganismos metanogênicos, além de estar presente em excesso o substrato e nutrientes, permitindo a reação depender apenas da concentração do inóculo (CHERNICARO, 2007).

Ao trabalhar com excesso de substrato e nutrientes, a concentração inicial do inóculo partiria a definir a duração do teste. Procurando assim uma maior concentração de biomassa e conseqüente relação de alimentos/microrganismos (A/M) menor, visando uma degradação mais rápida do substrato disponível (AQUINO, *et. al.*, 2007).

Inúmeros testes costuma incubar os frascos de reação sob agitação, permitindo assim o contato suficiente da biomassa como o substrato, não havendo limitação de transferência de massas do substrato e nutrientes. A faixa de temperatura mais trabalhada consiste de 30 a 35 °C, permitindo melhores condições de crescimento dos microrganismos metanogênicos (CHERNICARO, 2007).

Durante a realização do teste de AME há produção do biogás, existindo distintos métodos de quantificação, os quais são classificados como manométricos ou volumétricos (LOUZADA E PEREZ, 2010).

#### 3.2.4. Teste de Biodegradabilidade.

O termo biodegradabilidade refere-se à tendência de transformação de determinados substratos pelos microrganismos presentes no ambiente. Essa transformação é catalisada por enzimas específicas produzida por microrganismos presentes no ambiente, estes são capazes de transformar substratos complexos em substratos simples para a sua assimilação. O metabolismo heterotrófico é responsável por esse processamento da matéria orgânica, baseado na necessidade de utilização da matéria orgânica como fonte alimentar para sobrevivência das células dos organismos (PROSAB, 2003).

Na literatura existem poucos métodos para avaliar a biodegradabilidade da matéria orgânica em condições anaeróbia, em contraponto aos testes em condições aeróbias. A maioria dos testes de biodegradabilidade da matéria orgânica em condições anaeróbias é baseada em técnicas de respirometria anaeróbia, consistindo em medir a produção dos principais gases produzidos pela digestão, o metano e dióxido de carbono (ROCHA, 2003).

Os testes de biodegradabilidade anaeróbia podem ocorrer em batelada ou contínuo. O método em batelada consiste em medir a pressão ou volume do biogás produzido conjuntamente com o decréscimo da DQO (Demanda Química do Oxigênio) total do sistema (ROCHA, 2003).

### 3.3. Aproveitamento energético do Biogás.

Biogás é uma mistura de gases, produzido a partir do processo fermentativo das bactérias anaeróbias na ausência de oxigênio. O composto pode ser produzido a partir de processos naturais ou antropogênicos. Como processos antropogênicos de produção citam-se como principais as plantações de arroz, fermentação entérica, degradação anaeróbia de biomassa, manejos de resíduos e perdas de gás natural. Exemplificam-se como processos naturais de produção os oceanos, pântanos e águas doces (MENESES, 2011).

O biogás se caracteriza por ser um gás incolor, geralmente inodoro (baixo teor de impurezas), leve e de baixa densidade. A mistura de gases é composta por 65% a 70% de CH<sub>4</sub>, 25% a 30% de CO<sub>2</sub>, e uma pequena quantidade de outros elementos, como

0% a 3% de N<sub>2</sub>, 0% a 1% de H<sub>2</sub>, 0% a 1% de O<sub>2</sub>, 0% a 1% de H<sub>2</sub>S e 0% a 1% de NH<sub>3</sub>. (PROSAB, 2003).

Quanto maior o teor de metano, o biogás será mais energético, devido a sua característica combustível. Ao atingir cerca de 60% o teor de metano, o poder calorífico inferior corresponderá a cerca de 5.500 kcal/m<sup>3</sup> (PROSAB,2003). O Quadro 2 traz o poder calorífico inferior de alguns combustíveis.

QUADRO 2- Levantamento na literatura referente ao poder calorífico de vários combustíveis e suas respectivas emissões em CO<sub>2</sub> equivalente.

Combustível	Poder calorífico inferior (PCI)	Fator de emissões indiretas (kg CO <sub>2</sub> /GJ, base PCI)
Petróleo	10800 kcal/kg	12,51
Gás Natural	8600 kcal/m <sup>3</sup>	5,55
Gás Natural liquefeito (GNL)	13140 kcal/kg	20
Querosene	10300 kcal/kg	13,34
Diesel	10700 kcal/kg	14,13
Gás Natural comprimido (GNC)	8600 kcal/m <sup>3</sup>	8,36
Biogás	5000 kcal/m <sup>3</sup>	0,246

Fonte: FERNANDES, 2013, *apud*, ABBASI *et al*, 2012.

O aproveitamento do biogás pode ser a partir da combustão e por meio da sua conversão em eletricidade, havendo a produção de energia elétrica ou térmica (MOREIRA, 2011).

Devido à propriedade energética do biogás, o composto pode levar a substituição dos combustíveis fósseis, além de contribuir com a diminuição dos gases de efeito estufa para atmosfera (MENESES, 2011).

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

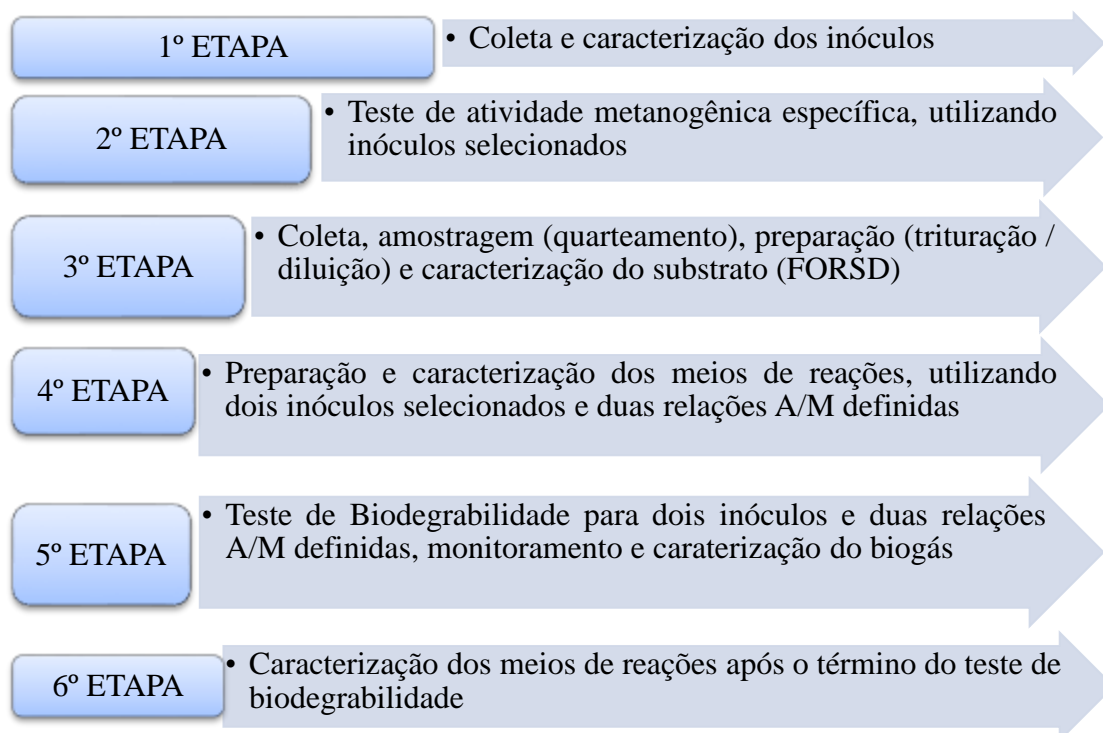
A pesquisa foi desenvolvida no LABOSAN (Laboratório de Saneamento) do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

O experimento consistiu na análise e avaliação de diferentes tipos de inóculos e relações Alimento/Microrganismos (A/M), a fim de otimizar a digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, os quais foram coletados nas residências próximas a Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici.

A pesquisa decorreu em seis etapas, nas quais estão esquematizadas na Figura 2. Na primeira fase, foram caracterizadas as propriedades físicas e químicas de quatro diferentes inóculos. No segundo momento, foi realizado o teste de atividade metanogênica específica.

Após a avaliação do desempenho dos inóculos, foram selecionados dois inóculos e proposto duas relações A/M, para o desenvolvimento do teste de biodegradabilidade. Ocorrendo também a caracterização física e química do substrato utilizado para a formação dos meios de reações para o teste de biodegradabilidade. Durante o teste de biodegradabilidade foram caracterizados os meios de reações antes e depois do teste.

FIGURA 2 - Etapas e fluxo dos processos desenvolvidos na pesquisa.



Os resultados de cada fase da pesquisa foram avaliados estatisticamente, com intuito de apresentar dados confiáveis a uma otimização na tecnologia dos reatores anaeróbios para tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos.

#### 4.1. Inóculos

De modo a potencializar o processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, optou-se por aplicar a técnica de inoculação. Foram selecionados quatro diferentes inóculos, oriundos de processos anaeróbios (Quadro 3).

QUADRO 3 – Denominação e características dos inóculos selecionados nesta pesquisa para utilização no teste de atividade metanogênica específica e biodegradabilidade, quanto ao processo e local de origem.

Inóculos	Processo de Origem	Local de Origem
Inóculo 1	Lodo anaeróbio, proveniente da digestão anaeróbia de efluente doméstico.	Lodo coletado em reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), localizado em uma estação de tratamento de esgoto doméstico no bairro Aracape.
Inóculo 2	Lodo anaeróbio, proveniente da digestão anaeróbia de efluente doméstico.	Lodo coletado de tanques sépticos de residências por caminhão limpa fossas, descarte ocorrendo em estação de tratamento de esgoto de companhia de saneamento.
Inóculo 3	Lodo anaeróbio, proveniente de digestão anaeróbia, a ser utilizado em tratamento de efluente industrial.	Lodo coletado de reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), inóculo adquirido de uma indústria de cerveja no município de Pacatuba, a ser utilizado no tratamento de efluente industrial.
Inóculo 4	Lixiviado, proveniente de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos.	Lixiviado coletado de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos do município de Fortaleza e região metropolitana (ASMOC), localizado em Caucaia.

Fonte: AUTORA, 2015.

Os inóculos foram coletados em baldes de polietileno com capacidade de 10L, previamente descontaminados com ácido clorídrico P.A. No momento da coleta, a temperatura foi medida *in loco*. O material, posteriormente, foi armazenado em galões de polietileno com capacidade de 5L, também descontaminados, e conservado sob-refrigeração a 4°C (Figura 3).

FIGURA 3– Registro fotográfico do procedimento realizado durante as coletas dos inóculos utilizados na pesquisa.



Fonte: AUTORA, 2015.

A: Coleta do inóculo – Lodo de tanque séptico; B: Medição de temperatura *in loco* – Lixiviado; C: Armazenamento da amostra coletada para frascos de polietileno – Lixiviado.

Cada inóculo foi caracterizado por meio de parâmetros físicos e químicos, sendo as análises realizadas no Laboratório de Saneamento. A tabela abaixo informa os parâmetros analisados e metodologias utilizadas (Quadro 4).

QUADRO 4 - Parâmetros físicos e químicos realizados para caracterização dos inóculos utilizados no teste de atividade metanogênica específica.

Parâmetros	Unidade	Método Analítico	Referência
pH	-	Potenciométrico	APHA, 2005
TU	%	Gravimétrico	APHA, 2005
PEL	mg/L	Gravimétrico	APHA, 2005
ST	mg/L	Gravimétrico - Secagem a 103 – 105°C	APHA, 2005
STV	mg/L	Gravimétrico – Ignição a 500 – 550°C	APHA, 2005
Alc.T	mg CaCO <sub>3</sub> /L	Titulação potenciométrica	Ribbas <i>et al</i> , 2007
AGV	mg HAc/L	Titulação potenciométrica	Ribbas <i>et al</i> , 2007
NTK	mg N /L	Kjedahl	APHA, 2005

PT	mg PO <sub>4</sub> /L	Espectrofotométrico (Digestão – ácido ascórbico)	APHA, 2005
DQO	mg O <sub>2</sub> /L	Colorimétrico por refluxo fechado	APHA, 2005

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; PEL: Peso Específico do Lodo; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

#### 4.2. Teste de Atividade Metanogênica Específica

A realização do teste de atividade metanogênica específica foi formulado a partir do protocolo proposto por Angelidaki *et al.* (2009), abaixo segue o roteiro utilizado no experimento:

1. Caracterizar o inóculo mediante aspectos físicos e químicos;
2. Separar os frascos de vidro necessários para análise do inóculo, lembrando que o frasco de reação deve possuir volume entre 100 e 2000 mL. Realizar este procedimento em triplicata;
3. Diluir o inóculo para atingir uma concentração inicial entre 2,0 e 5,0 g STV (faixa de concentração recomendada para testes de AME sob agitação);
4. Definir o substrato a ser utilizado no teste (Glicose, acetato, celulose, propionato e butirato);
5. Preparar a solução de macro e micronutrientes conforme os Quadros 5 e 6. É adicionado 1ml da solução de micronutrientes a 1 litro da solução de macronutrientes, compondo a solução de nutrientes;

QUADRO 5- Solução padrão de macronutrientes a ser adicionado nos frascos de reações para o teste de atividade metanogênica específica.

Nutriente	Concentração (mg/L)
NH <sub>4</sub> Cl	280
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	250
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	100
CaCl <sub>2</sub> .6h <sub>2</sub> O	10

Fonte: DOS SANTOS, 2005.

QUADRO 6 - Solução padrão de micronutrientes a ser adicionado nos frascos de reações para o teste de atividade metanogênica específica

Nutriente	Concentração (mg/L)
-----------	---------------------

H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	50
FeCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	2000
ZnCl	50
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	500
CuCl <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	38
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>4</sub> .4H <sub>2</sub> O	50
AlCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	90
CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	2000
NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	92
NaSeO <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	162
EDTA	1000
HCl	1

Fonte: DOS SANTOS, 2005.

6. Ajustar o pH da solução de substrato e nutrientes numa faixa entre 6,8 e 7,2;
7. Adicionar 1 g de bicarbonato de sódio para cada litro de solução nutritiva;
8. Adicionar os volumes determinados das soluções de lodo e substrato nos frascos de reação de modo a se obter a concentração final da mistura de 2,5 g DQO/L, destaca-se que o volume da mistura (lodo + substrato + solução nutritiva) deverá ocupar de 70 a 90% da capacidade do frasco;
9. Completar o volume da mistura definido com a solução tampão e de nutrientes;
10. Lacrar devidamente os frascos de reação, evitando a fuga do biogás durante o teste;
11. Remover o O<sub>2</sub> no interior do frasco, purgando-o com um gás inerte;
12. Certificar-se de que a pressão no interior do frasco seja igual à atmosférica (1 atm);
13. Incubar os frascos a 35 °C sob agitação a 150 rpm;
14. Monitorar a produção de metano diariamente por um período suficiente para cessar ou estabilizar a produção de biogás.

Abaixo segue o esquema dos cálculos necessários para realização do teste:

- ✓ Determinação do volume de inóculo adicionado em cada frasco de reação (Equação 1):

$$V_i (mL) = \frac{V_{mist} \times C_{mist}}{C_i}$$

equação 1



Onde:

$V_i$  = volume do inóculo (mL);

$C_i$  = concentração do inóculo (g STV/L)

$V_{mist}$  = volume da mistura (mL);

$C_{mist}$  = concentração da mistura (g STV/L).

- ✓ Determinação do volume de substrato a ser adicionado em cada frasco a fim de se obter concentração final de DQO de 2,5 g DQO/L (Equação 2):

$$V_s (mL) = \frac{2,5 \text{ mg DQO/mL} \times V_{mist}}{C_s}$$

equação 2

Onde:

$V_s$  = volume do substrato (mL);

$C_s$  = concentração do inóculo (mg DQO /mL)

$V_{mist}$  = volume da mistura (mL);

$C_{mist}$  = concentração da mistura (mg DQO/mL) = 2,5 mg DQO/L = 2,5 g DQO/L.

- ✓ Determinação do volume da solução de tampão e de nutrientes (Equação 3):

$$V_{stn} = V_{mist} - V_i$$

Onde:

equação 3

$V_{stn}$  = volume da solução de tampão e de nutrientes (mL);

$V_{mist}$  = volume da mistura (mL);

$V_i$  = volume do inóculo (mL).

- ✓ Cálculo da AME (Equação 4):

$$AME = \frac{\frac{V_{CH_4}}{t}}{FC \times STV \times \frac{V_{mist}}{1000}}$$

equação 4

Onde:

AME = Atividade metanogênica específica (g DQO- $CH_4$ /gSTV.d)

$V_{CH_4}$  = volume de metano produzido durante todo o experimento (mL);

FC = fator de conversão estequiométrico (390 mL de  $CH_4$ /g DQO<sub>rem</sub>);

STV = sólidos totais voláteis (g/L).

Neste experimento, optou-se por utilizar como substrato a glicose na realização do teste de AME. Durante o teste, foram preparados meios de reação com os quatros tipos de inóculos em triplicata. Existindo frascos controles, nos quais não foram adicionados substratos, com o intuito de avaliar atividade endógena dos microrganismos.

A concentração do inóculo escolhido foi de 5,0 g STV/L, buscando uma relação A/M de 0,5, exceto para o inóculo 4, devido ao seu baixo teor de sólidos optando por uma concentração de 1,0 g STV/L. Obtendo uma concentração final da mistura (substrato + inóculo + solução nutritiva) de 2,5 g DQO/L. Os frascos de vidro âmbar utilizados possuíam cerca de 110 mL, a mistura ocupou 70% do volume do frasco, conforme ilustrado na Figura 4.

FIGURA 4 - Frascos preparados para realização do teste de AME.



Fonte: AUTORA, 2015.

Após os frascos devidamente lacrados, realizou-se a purga do gás presente no frasco com N<sub>2</sub> grau FID, durante 1 minuto (Figura 11). Posteriormente, incubaram-se os frascos em um *shaker* orbital MA-420 Marconi, até que a produção de biogás cessasse (Figura 5). Optou-se por uma temperatura de 35°C e agitação de 150rpm.

FIGURA 5 - Lacrando e purgando com N<sub>2</sub> os frascos para realização do teste de AME.



Fonte: AUTORA, 2015.

A: Lacrando os frascos a serem utilizados no teste de AME. B: Purgando o gás presente nos frascos com N<sub>2</sub> grau FID por 1 minuto, antes do início do teste de AME.

FIGURA 6 - Incubação dos frascos a agitação e temperatura controladas.



Fonte: AUTORA, 2015.

O biogás produzido foi quantificado por meio do método manométrico, com auxílio de leitores de pressão, no qual apresentam constantes a temperatura e o volume da fase gasosa, portanto o acréscimo de pressão no frasco representava o volume de biogás produzido (Figura 6).

FIGURA 6 - Leitor de pressão em mBar, utilizado no teste de AME.



Fonte: AUTORA, 2015.

A caracterização e quantificação do biogás foram realizadas por cromatografia gasosa, utilizando um cromatógrafo GC 17A, marca *Shimadzu*, acoplado a um detector de condutividade térmica (TCD) (Figura 7).

FIGURA 7- cromatógrafo GC 17A, marca Shimadzu, acoplado a um detector de condutividade térmica (TCD).

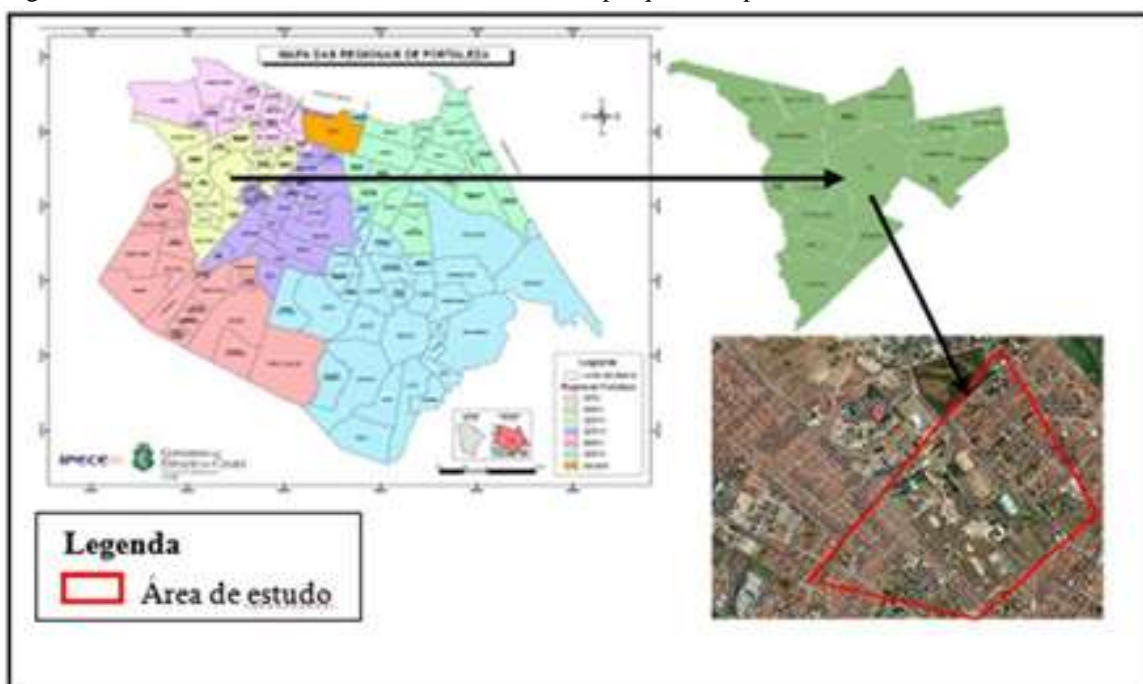


Fonte: AUTORA, 2015.

### 4.3. Substrato

O substrato utilizado no experimento consiste na fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares, coletados nas residências do bairro Planalto Pici. A região é pertencente ao município de Fortaleza-CE, dentro da subdivisão em regionais, a área é administrada pela Secretaria Executiva Regional III (SER III), com uma população estimada em 51.921 habitantes, bairro mais populoso dessa regional (LEV-UFC, 2011). A população possui renda inferior a 4,6 salários mínimos e um IDHM-B (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal por Bairro) de 0,2186 sendo considerado baixo (BARREIRA *et. al.*, 2011; PMF, 2014). Optou-se por esse bairro devido próximo à universidade, no qual o trabalho foi desenvolvido, assim favorecendo a logística da coleta (Figura 8).

FIGURA 8 - Localização geográfica da região, bairro Planalto Pici em Fortaleza - CE, no qual as frações orgânicas de resíduos sólidos domiciliares utilizados na pesquisa são provenientes.



Fonte: AUTORA, 2015.

A fração orgânica foi coletada por meio de um trabalho de conscientização com cerca de 100 residências. Após a coleta do substrato, o resíduo foi amostrado por meio da metodologia de quarteamento, consistindo basicamente em dividir o total da amostra em quatro partes iguais, depois retirando duas partes opostas e unificando as duas partes restantes, até restar uma amostra com quantidade e características

significativas para a pesquisa, conforme a ABNT nº 10007 de 30 de novembro de 2004 (Figura 9).

FIGURA 9 – Registro fotográfico da realização da coleta e amostragem, que ocorreram durante a pesquisa.



Fonte: AUTORA, 2015.

A: Coleta da fração orgânica dos resíduos sólidos nas residências do bairro Planalto Pici. B: Amostragem da fração orgânica coletada, por meio da metodologia de quarteamento.

A amostra necessitou ser triturada para realização da caracterização, sendo utilizado um liquidificador industrial de aço inox com capacidade de até 10L (Figura 10). O substrato foi armazenado sob-refrigeração a 4° C, para inibir a atividade dos microrganismos presente.

FIGURA 10 – Registro fotográfico da atividade de trituração da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares realizada na pesquisa, tornando apto o material para ser utilizado como substrato no teste de biodegradabilidade e sua caracterização.



Fonte: AUTORA, 2015.

A: Liquidificador industrial de aço inox com capacidade de até 10 L, utilizado para triturar o resíduo orgânico coletado. B: Substrato após trituração, apto a ser utilizado nos testes.

No Laboratório de Saneamento, a fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares foi caracterizada por meio de parâmetros físicos e químicos, conforme a metodologia presente no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005) e Ribbas *et al* (2007), o Quadro 7 informa os parâmetros analisados.

QUADRO 7 - Parâmetros físicos e químicos realizados para caracterização da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares, a ser utilizado na pesquisa como substrato no teste de biodegradabilidade.

Parâmetros	Unidade	Método	Referência
pH	-	Potenciométrico	APHA, 2005
TU	%	Gravimétrico	APHA, 2005
ST	mg/Kg	Gravimétrico - Secagem a 103 – 105°C	APHA, 2005
STV	mg/Kg	Gravimétrico – Ignição a 500 – 550°C	APHA, 2005
Alc.T	mg CaCO <sub>3</sub> /Kg	Titulação potenciométrica	Ribbas <i>et al</i> , 2007
AGV	mg HAc /Kg	Titulação potenciométrica	Ribbas <i>et al</i> , 2007
NTK	mg N /Kg	Kjedahl	APHA, 2005

PT	mg PO <sub>4</sub> /Kg	Espectrofotométrico (Digestão – ácido ascórbico)	APHA, 2005
DQO	mg O <sub>2</sub> /Kg	Colorimétrico por refluxo fechado	APHA, 2005

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

#### 4.4. Teste de Biodegradabilidade

O teste de biodegradabilidade também se baseou no protocolo sugerido por Angelidaki *et al.* (2009) e no roteiro exposto no subitem anterior. Também utilizando para as determinações necessárias neste teste, o mesmo esquema dos cálculos já exposto no subitem anterior.

Como principal adaptação, têm-se a utilização da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares coletados no bairro Planalto Pici, com o intuito de avaliar a produção de biogás e o percentual de metano produzido, além da remoção de carga orgânica presente no sistema.

Neste experimento, optou-se por realizar o teste de biodegradabilidade com apenas dois tipos de inóculos, Inóculo 1 e o 3, devido apresentarem uma elevada atividade metanogênica e possuírem características semelhantes. Trabalhou-se também com duas relações A/M de 0,5 e 1,0 para cada inóculo testado, caracterizando os meios de reações antes e depois do teste. Os frascos de vidro âmbar utilizados possuíam cerca de 250 mL, a mistura ocupou 70% do volume do frasco. Optou-se por não utilizar solução de nutrientes neste teste, devido à alta concentração de nutrientes presentes na fração orgânica de resíduos sólidos, utilizados como substratos.

Decidiu-se a não realização da purga do gás presente no frasco com N<sub>2</sub> grau FID, assim podendo avaliar a importância deste procedimento no teste. Os procedimentos de incubação dos frascos, quantificação e caracterização do biogás produzido ocorreram nas mesmas condições e utilizando os mesmos instrumentos do teste de AME descrito no subitem anterior.

A cada condição específica dos frascos incubados procurou-se caracterizar a solução, por meio de parâmetros físicos e químicos, no caso os mesmos utilizados para caracterizar os substratos (Quadro 7). Ao fim do teste, quando a produção de biogás cessou, foram novamente caracterizados a solução restante nos frascos. Devido à



dificuldade de realização da análise de NTK, por problemas na logística laboratorial, só foi possível caracterizar os meios de reação para este parâmetro antes do teste de biodegradabilidade.

#### **4.5. Análise estatística dos dados**

De forma a auxiliar na interpretação dos resultados obtidos em cada fase da pesquisa, utilizou-se como ferramenta base a estatística. O auxílio da estatística pode influir na análise de dados, escolha do método e programa de análise, na apresentação, interpretação e dimensionamento dos resultados.

Nesta pesquisa foi utilizado o programa estatístico R versão 3.1.1 (10/07/2014). Copyright (C) 2014 The R Foundation for Statistical Computing. Plataforma: i386-w64-mingw32/i386 (32-bit). Além da utilização do programa Microsoft Office Excel 2010, para tabulações de dados, elaboração de tabelas e gráficos.

As características físicas e químicas dos inóculos estudados foram tratadas por meio da análise de variância (ANOVA) ao nível de significância de 5% para comparação entre os grupos. Ao trabalhar a Estatística F dessa metodologia, teste de F, correlaciona-se o tamanho da diferença entre as amostras, em função do tamanho da variação dentro de cada amostra. Comparando o p-valor e o nível de significância adotado, pode-se ou não rejeitar a hipótese nula de igualdade, ou seja, haverá ou não evidência significativas entre os tratamentos.

Aos resultados que apresentarem efeito significativo entre os tratamentos, por meio da análise de variância, foram submetidos ao Teste de Tukey, como teste complementar ao teste F, permitindo comparações múltiplas entre duas médias de tratamento.

Utilizou-se também o diagrama de caixas ou box-plot com intuito de avaliar o comportamento dos resultados, tais como dispersão e simetria. O box-plot é um método que permite sumarizar um conjunto de dados, sendo constituído por valores máximos e mínimos, mediana e quantis superior e inferior.

De modo a estudar todos os parâmetros simultaneamente, aplicou-se a técnica matemática da análise multivariada, por meio da análise de componentes principais, o qual permite investigar um grande número de dados disponíveis. A análise das componentes principais transforma um conjunto de variáveis em um conjunto de

componentes com dimensões equivalentes. O objetivo do método é a geração, seleção e interpretação dos componentes, assim como determinar as variáveis de maiores influencia na formação de cada componente (VICINI, 2005).

Na pesquisa utilizou-se modelos de regressão não-linear, mais especificamente as funções sigmoidais (forma de S), para descrever a produção cumulativa do metano na avaliação da Atividade Metanogênica Especifica dos inóculos e teste de biodegradabilidade dos meios de reações estudados.

Os modelos de regressão, linear ou não-linear, são bastante uteis na análise de dados, pode-se avaliar uma possível relação entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. Um modelo de regressão não-linear consiste em pelo menos um de seus parâmetros aparecem de forma não-linear, se destaca as curvas sigmoides com um desses modelos (MAZUCHELI E ACHCAR, 2002). As curvas sigmoides, “inicia em algum ponto fixo, com a razão de crescimento aumentando monotonicamente até atingir o ponto de inflexão e, em seguida, essa razão decai até aproximar assintoticamente de algum valor final (UEDA,2003)”.

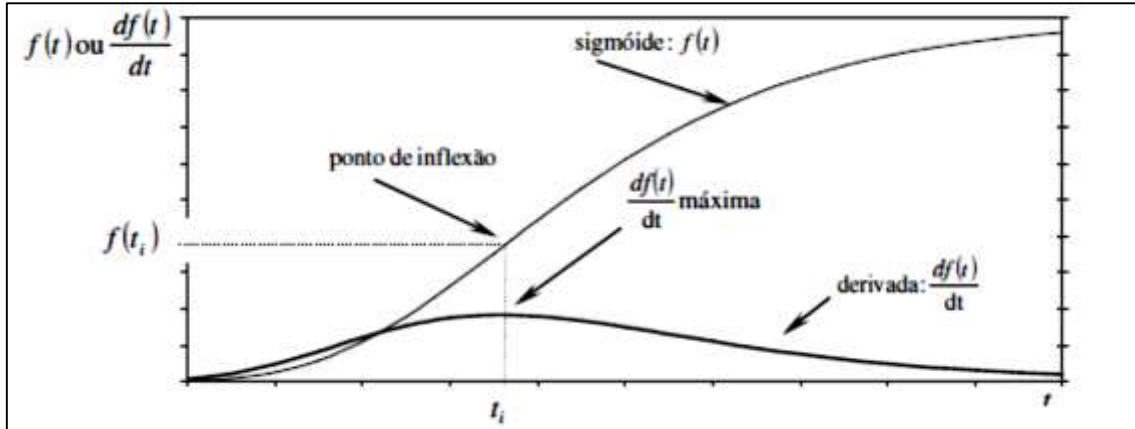
As funções sigmoidais utilizadas neste trabalho foram a Logística, Gompertz, Richards, MMF, Weibull e Boltzaman, no quadro abaixo (Quadro 8) lista-se as características de cada função. Também pode ser observado melhor o comportamento dessa função por meio da Figura 11.

QUADRO 8- Funções sigmoidais de crescimento utilizadas para avaliação da produção de metano na pesquisa e suas características.

Função	Expressão matemática $f(t), t \geq 0$	Restrições para os parâmetros	$f'(t) = \frac{dy}{dx} f(t)$	Coordenadas do ponto de inflexão $(t, f(t))$
Logística	$\frac{\alpha}{1 + \beta e^{-\gamma t}}$	$\alpha > 0, \beta > 1$ e $\gamma > 0$	$\frac{\alpha \beta \gamma e^{-\gamma t}}{(1 + \beta e^{-\gamma t})^2}$	$t = \frac{1}{\gamma} \ln \beta, y = \frac{\alpha}{2}$
Gompertz	$\alpha e^{-\beta e^{-\gamma t}}$	$\alpha > 0, \beta > 1$ e $\gamma > 0$	$\alpha \beta \gamma e^{-\beta e^{-\gamma t}} e^{-\gamma t}$	$t = \frac{1}{\gamma} \ln \beta, y = \alpha e^{-1}$
Richards	$\frac{\alpha}{(1 + \beta e^{-\gamma t})^{1/\delta}}$	$\alpha > 0, \beta > 1, \gamma > 0$ e $\delta > 0$	$\frac{\alpha \beta \gamma M^{\frac{1}{\delta}-1} e^{-\gamma t}}{\delta (M^{\frac{1}{\delta}})^2}$ $M = 1 + \beta e^{-\gamma t}$	$t = \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\beta}{\delta}\right),$ $y = \frac{\alpha}{(1+\delta)^{1/\delta}}$
MMF	$\frac{\beta \gamma + \alpha t^\delta}{\gamma + t^\delta}$	$0 < \beta < \alpha, \gamma > 0$ e $\delta > 1$	$\frac{\delta \alpha t^{\delta-1} L - N \delta t^{\delta-1}}{L^2}$ $N = \beta \gamma + \alpha t^\delta$ $L = \gamma + t^\delta$	$t = \left(\frac{\gamma(\delta-1)}{\delta+1}\right)^{1/\delta},$ $y = \frac{\alpha(\delta-1) + \beta(\delta+1)}{2\delta}$
Weibull	$\alpha - (\alpha - \beta) e^{-\gamma t^\delta}$	$0 < \beta < \alpha, \gamma > 0$ e $\delta > 1$	$\gamma \delta (\alpha - \beta) e^{-\gamma t^\delta} t^{\delta-1}$	$t = \left(\frac{\delta-1}{\gamma \delta}\right)^{1/\delta},$ $y = \alpha - (\alpha - \beta) e^{\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)}$
Boltzman	$\frac{\delta}{1 + e^{\frac{t-\beta}{\gamma}}} + \alpha$	$\alpha > 0, \beta > 0, \gamma > 0,$ $\delta < 0$ e $\alpha > (-\delta / (1 + e^{-\frac{\beta}{\gamma}}))$	$\frac{-\delta e^{\frac{t-\beta}{\gamma}}}{\gamma (1 + e^{\frac{t-\beta}{\gamma}})^2}$	$t = \beta, y = \frac{\delta}{2} + \alpha$

Fonte: FLORENTINO, BISCARO E PASSOS, 2010.

FIGURA 11- Representação do comportamento de uma função sigmoideal e seus componentes.



Fonte: FLORENTINO, BISCARO E PASSOS, 2010.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Caracterização físico-química dos inóculos

#### 5.1.1. pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV).

O pH dos inóculos estudados tendem a neutralidade (pH = 7,0), conforme observado na Tabela 1. Próximos a neutralidade, pH entre 6 e 8, os microrganismos produtores de metano atingem uma estabilidade na formação do metano (CHERNICARO, 2007). Os lodos utilizados possuem uma variação típica dos lodos brutos das estações de tratamento de esgoto (ETE) do país, pH entre 5,0 e 8,0 (MACHADO, 2001).

TABELA 1— Resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) para caracterização para inóculos estudados

Amostras	Resultados		
	pH	AlcT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	AGV (mg HAc/L)
Lodo UASB - ETE Aracape - Inóculo 1	7,18	754,0	81,1
Lodo de Tanque Séptico - Inóculo 2	6,88	795,7	279,1
Lodo UASB - ETE Industrial - Inóculo 3	7,35	671,7	118,8
Lixiviado - ASMOC - Inóculo 4	8,15	4930,7	1066,3

Fonte: AUTORA, 2015.

AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis.

Em uma pesquisa realizada por diversas universidades brasileiras, determinou-se para diferentes amostras de lodo de tanque séptico concentrações de pH variando de 6,6 a 7,2, não se distinguindo do valor encontrado na pesquisa para o mesmo tipo de inóculo, pH é 6,8 (PROSAB, 2009).

Quanto ao pH de lixiviados provindos de aterros sanitários, os valores variam quanto a idade do aterro, sendo classificado segundo a idade como jovens, médio e velho, com uma faixa de pH respectivamente de < 6,5, 6,5 a 7,5 e >7,5 (SANTOS, 2009). A amostra de lixiviada utilizada na pesquisa foi coletada de um aterro considerado velho, segundo a sua idade de operação, encontrando um pH de 8,1, dentro do que se é previsto na literatura. Indicando também que o inóculo se encontra na fase metanogênica, por apresentar um pH entre 7,5 e 9,0, (SANTOS, 2009).

As alcalinidades dos inóculos provenientes de lodos de ETEs, conforme enumerado na Tabela 3, encontram-se dentro da faixa de 500 a 1.500 mg/L CaCO<sub>3</sub>

apontada pela literatura. As altas concentrações de alcalinidades como detectado na amostra de lixiviado, também está dentro da faixa citada em estudos de 850 a 17.500 mg/L CaCO<sub>3</sub>, a qual favorece o tamponamento do sistema para a digestão anaeróbia e consequente manutenção do pH (SEGATO, 2000; SANTOS, 2009).

Já para os ácidos orgânicos, grande parte desses inóculos, ainda verificando na Tabela 3, apresentaram valores pouco abaixo da faixa citada na literatura de 200 a 2.000 mg/L HAc (MACHADO, 2001).

### 5.1.2. Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Teor de Umidade (TU) e Peso Específico do Lodo (PEL).

O teor de sólido presente no lodo de esgoto bruto varia de 1 a 10%, portanto apresentando um teor de umidade variando de 90 a 99%, sendo basicamente constituído por água (MORAES, 2005). Enquadra-se nesta faixa os inóculos estudados, conforme observado na Tabela 2, os inóculos 1, 2 e 3, respectivamente, possuem teor de sólidos de 9,8%, 2,3% e 5%.

TABELA 2 – Resultados dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), relação STV/ST e Teor de Umidade para os inóculos estudados.

Amostras	Resultados			
	ST (mg/L)	STV (mg/L)	STV/ST	TU (%)
Lodo UASB - ETE Aracape - Inóculo 1	96690	53860	0,56	90,2
Lodo de Tanque Séptico - Inóculo 2	22590	15440	0,68	97,7
Lodo UASB - ETE Industrial - Inóculo 3	52810	30020	0,57	94,5
Lixiviado - ASMOC - Inóculo 4	9850	1320	0,13	-

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis.

Andreoli (2001) lista mais especificamente o teor de sólidos para diferentes tipos de lodos de acordo com seu tratamento, lodos provenientes de tanques sépticos e reator UASB apresentam de 3 a 6 % ST, enquadrando somente nesta faixa o inóculo de tanque séptico estudado.

Analisando as relações STV/ST dos inóculos provenientes de lodo de ETEs, indica-se a fração orgânica e o nível de digestão do lodo, na qual para lodos digeridos essa relação encontra-se entre 0,60 e 0,65 (ANDREOLI, 2001). Caracterizando como

lodo digerido, apenas o inóculo 2 com uma relação STV/ST de 0,68. As outras relações STV/ST de 0,56 e 0,57, conforme apontados na Tabela 2, se enquadram na faixa indicada de 0,55 a 0,60 pelo o autor para um lodo secundário anaeróbio.

Quanto ao teor de sólidos presentes em lixiviados provindos de aterros sanitários do país, Pimentel (2012) aponta concentrações mais prováveis para sólidos totais entre 3.200 e 14.400 mg/L e sólidos voláteis entre 2.100 e 8.300 mg/L. Valores próximos aos apresentados foram detectados para o inóculo 4 com ST de 9.850 mg/L e STV de 1.320 mg/L.

### 5.1.3. Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK), Fósforo Total (PT) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

Jordão e Pêsoa (2005), apontam para o lodo digerido concentrações de nitrogênio (NTK) e fósforo (PT), respectivamente, 10 a 400 mg/L e 20 a 240 mg/L. Valores bem abaixo dos encontrados para os inóculos provenientes reatores UASB, conforme observado na Tabela 3, indicando as amostras como lodo não digerido ou bruto.

O autor também cita para lodo de fossa séptica concentração de nitrogênio (NTK) e fósforo (PT), respectivamente, na faixa de 100 a 1600 mg/L e 50 a 800 mg/L (JORDÃO E PÊSSOA, 2005). Taxas compatíveis com a amostra de tanque séptico obtido no estudo, a qual apresentou um a concentração aproximadamente de nitrogênio e fósforo, respectivamente, 864 mg/L e 417 mg/L.

TABELA 3 – Resultados dos parâmetros Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) e Fósforo Total (PT) para os inóculos.

Amostras	Resultados		
	NTK (mg N /L)	PT (mg PO <sub>4</sub> /L)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)
Lodo UASB - ETE Aracape - Inóculo 1	1860,0	997,5	25387,5
Lodo de Tanque Séptico - Inóculo 2	864,1	416,8	19510,0
Lodo UASB - ETE Industrial - Inóculo 3	1111,0	495,7	21160,0
Lixiviado - ASMOC - Inóculo 4	1135,7	4,2	5160,0

Fonte: AUTORA, 2015.

NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

Nos lixiviados provindos de aterros sanitários, a literatura aponta concentrações bem distintas para o nitrogênio, 50 a 5.000 mg/L, e o fósforo, 0,1 a 31

mg/L. Concentrações compatíveis a amostra de lixiviado analisada, a qual apresentou 1.136 mg/L de nitrogênio e 4,2 mg/L de fósforo.

A concentração de DQO encontrado nos lodos de ETEs varia conforme o tipo e a eficiência do processo de tratamento dos efluentes. Jordão e Pessoa (2005), cita para lodo digerido uma concentração entre 290 e 8.140 mg/L. Valores bem abaixo dos analisados nas amostras provindas de reatores UASB, conforme observados na Tabela 3, indicando um lodo não digerido ou bruto.

Gonçalves (2008), elencou para lodo de tanque séptico uma faixa de concentração de DQO de 1.500 a 703.000 mg/L. A amostra analisada do inóculo 2, encontra-se dentro do que esperado pela literatura, com uma concentração média de DQO de 19.510 mg/L.

Quanto a concentrações de DQO em lixiviados de aterros sanitários, a literatura classifica faixas proporcionais à idade de operação. Para sistemas operando de 10 a 15 anos, encontra-se uma DQO de 1.000 a 5.000, valor próximo ao determinado no inóculo 4 com 5.160 mg/L (PIMENTEL, 2012).

#### 5.1.4. Aplicando ANOVA e Tukey.

Utilizou-se a análise de variância (ANOVA) para comparar as médias de cada parâmetro dos inóculos estudados, assim detectando a existência de diferenças entre os mesmos. Os resultados estatísticos obtidos por meio da ANOVA podem ser observados na Tabela 4.

TABELA 4- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização dos inóculos, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos.

Tabela da ANOVA	Soma quadrado	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
pH	1,762	0,5873	23491	6,04E-09
Resíduo	0,0001	0,0000		
AlcT	26353430	8784477	11144	2,68E-08
Resíduo	3153	788		
AGV	1277212	425737	82,81	4,68E-04
Resíduo	20565	5141		
TU	56,73	28,365	3404	9,24E-06
Resíduo	0,03	0,008		
PEL	944,4	472,2	1,803	0,306
Resíduo	785,9	262,0		
ST	8,939E+09	2,980E+09	1830	9,94E-07



Resíduo	6,513E+06	1,628E+06		
STV	3,020E+09	1,007E+09	1171	2,42E-06
Resíduo	3,439E+06	8,598E+05		
NTK	1106183	368728	8,764	0,0312
Resíduo	168284	42071		
PT	996754	332251	2326	6,15E-07
Resíduo	571	143		
DQO	463106759	154368920	74,89	0,00057
Resíduo	8245312	2061328		

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; PEL: Peso Específico do Lodo; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

Considerando o nível de significância igual a 5%, conforme a Tabela 4, somente não foi rejeitada a hipótese de igualdade entre a média do parâmetro peso específico do lodo (PEL). Para os demais parâmetros é possível rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias. Aplicou-se o Teste de Tukey para avaliar as diferenças encontradas para cada parâmetro analisado, com intervalo de confiança de 95%.

Conforme analisando no ANOVA, no qual o p-valor foi igual a 0,306, para o parâmetro peso específico do lodo, não apresentando diferença entre as médias analisadas, considerando o nível de significância de 5%, o qual se observa na Tabela 5. Pode-se observar melhor no gráfico de Tukey (Figura 12), a hipótese nula de igualdade para os intervalos de confiança que contém o “0”.

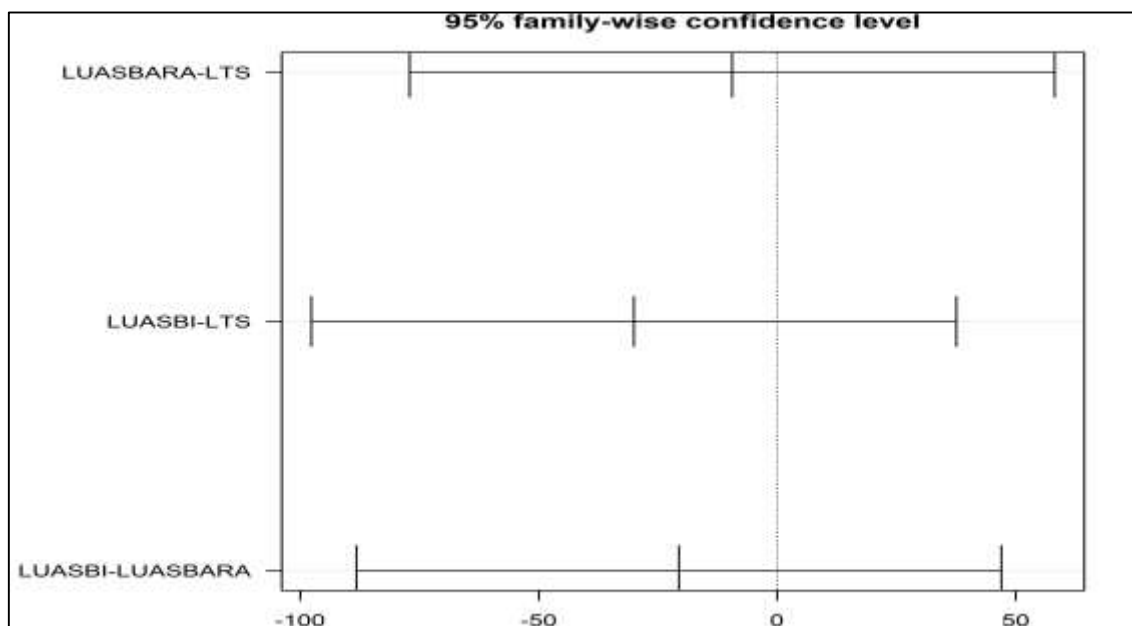
TABELA 5- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias do Peso Específico do Lodo (PEL) entre amostras dos inóculos.

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LUASBARA-LTS	-9,45	-77,08618	58,18618	0,8378753
LUASBI-LTS	-30,05	-97,68618	37,58618	0,2942542
LUASBI-LUASBARA	-20,60	-88,23618	47,03618	0,4972232

Fonte: AUTORA, 2015.

LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3).

FIGURA 12- Gráfico de Tukey para comparação das médias do Peso Específico do Lodo (PEL) entre amostras dos inóculos.



Fonte: AUTORA, 2015.

LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3).

#### 5.1.5. Análise por Componentes Principais (PCA).

A interpretação dos componentes principais consiste em analisar a influência de cada variável sobre cada componente, mediante o grau de importância. Assim, quando o objetivo da análise é comparar indivíduos e/ ou agrupá-los calcula-se para cada indivíduo valores (*scores*) como para cada componente.

Um dos critérios de seleção dos componentes principais (PC) consiste em incluir somente os componentes com autovalores maiores que 1 ou componentes com variância acumulativa acima de 70%. Conforme os critérios de seleção citados grifaram-se na Tabela 6 os valores de maior relevância das componentes principais, sendo que PC1 e PC2 explicam 87,83% dos resultados.

TABELA 6- Resumo da análise de componentes principais para as amostras de inóculos analisados.

PC	Autovalor	Percentagem de variância	Percentual acumulado de variância
PC1	<b>6,43</b>	64,29	<b>64,29</b>
PC2	<b>2,35</b>	23,54	<b>87,83</b>
PC3	<b>1,05</b>	10,51	<b>98,33</b>
PC4	0,11	1,06	99,40
PC5	0,05	0,51	99,90
PC6	0,01	0,09	99,99

PC7	0,00	0,01	100,00
-----	------	------	--------

Fonte: AUTORA, 2015.

PC: Componente Principal.

Ao calcular-se valores (*scores*) para cada resultado dos inóculos atribuiu-se no primeiro componente principal (PC1) maiores diferenças para a amostra de lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1) e lixiviado de aterro sanitário (Inóculo 4). Já para o segundo componente principal (PC2) as maiores diferenças são para as amostras de lodo de tanque séptico (Inóculo 2) e lixiviado de aterro sanitário, conforme grifado na Tabela 7.

TABELA 7 – Análise dos componentes principais para cada inóculo.

Tratamento	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
LUASBARA11	<b>25,21</b>	15,72	2,16	41,26	1,40
LUASBARA12	<b>18,81</b>	5,20	5,44	36,83	15,89
LTS21	0,22	<b>27,93</b>	1,44	4,12	3,20
LTS22	0,36	<b>28,00</b>	9,86	1,29	0,84
LUASBI31	1,15	0,86	80,54	0,05	2,59
LUASBI32	0,94	1,44	0,03	15,48	60,28
LIXASM41	<b>25,11</b>	<b>10,44</b>	0,24	0,61	6,10
LIXASM42	<b>28,20</b>	<b>10,41</b>	0,28	0,36	9,70

Fonte: AUTORA, 2015.

Na Tabela o primeiro número representa a diferenciação entre os inóculos e o segundo indica a sequencia do resultado, realizado em duplicata. LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3); LIX: Lixiviado coletado no ASMOC (Inóculo 4); PC: Componente Principal.

No caso das variáveis analisadas, no primeiro componente principal (PC1) o STV, PT e DQO são as variáveis mais relevantes na formação dos grupos e no segundo componente principal (PC2) as variáveis mais relevantes são pH, TU e NTK, como pode ser observado na Tabela 8.

TABELA 8– Análise dos componentes principais para cada variável analisa para amostras de inóculos.

Variaveis	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	7,61	<b>19,95</b>	1,97	10,80	16,53
TU	4,39	<b>29,92</b>	0,22	8,88	3,00
PEL	0,03	2,07	89,92	3,22	1,85
ST	13,67	4,75	0,01	8,76	0,06
STV	<b>14,74</b>	1,97	0,02	4,98	0,10
AlcT.	11,07	11,50	0,94	0,59	7,64
AGV	12,81	5,75	1,68	2,06	35,13

NTK	6,36	<b>20,82</b>	3,23	58,16	10,42
PT	<b>15,15</b>	0,27	0,80	0,08	21,09
DQO	<b>14,18</b>	2,99	1,21	2,47	4,19

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; PEL: Peso Específico do Lodo; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio; PC: Componente Principal.

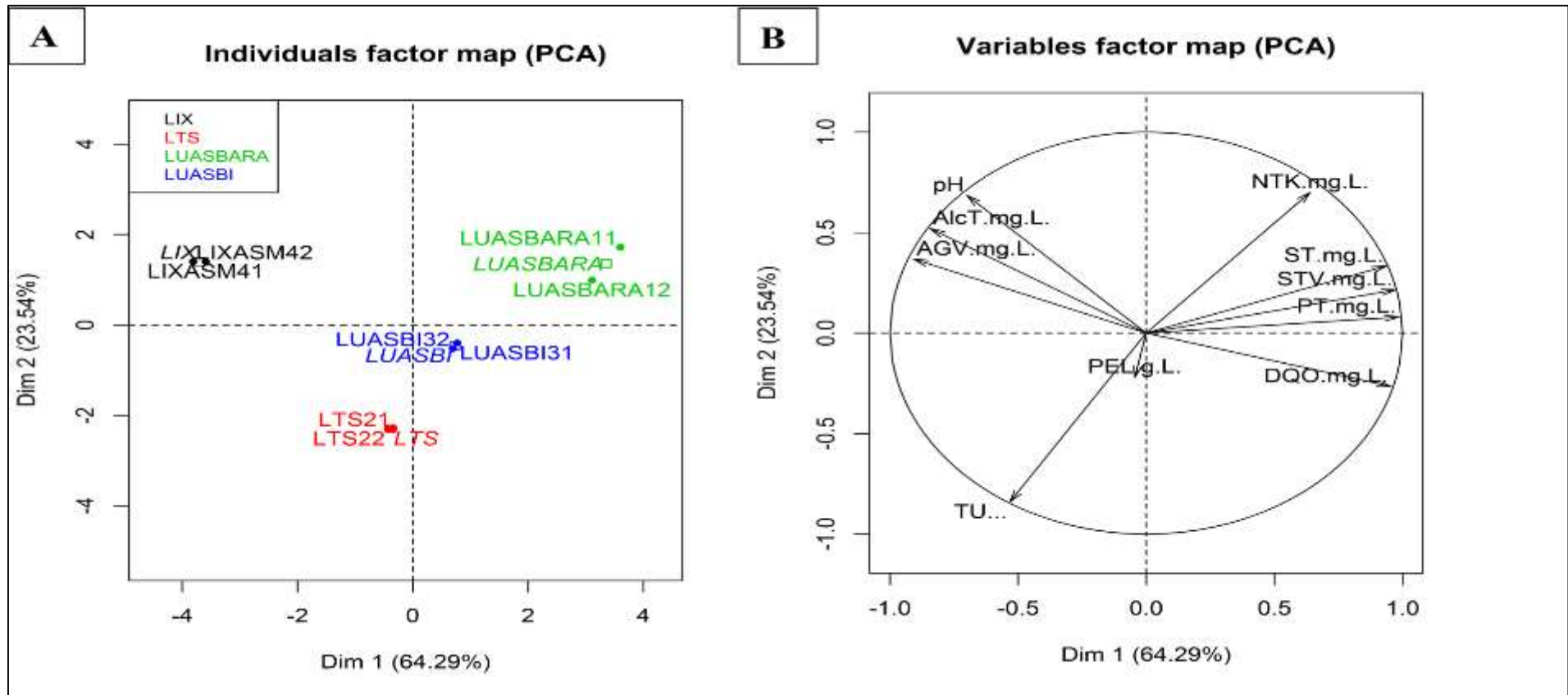
Após analisar os dados das tabelas acima, torna-se mais fácil a interpretação dos diagramas de *scores e loadings*, a partir da Figura 13. Portanto, o primeiro componente explicou 64,29% da variância total dos dados e 23,54% é explicado pelo segundo componente.

No diagrama de *scores* (Figura 13A) houve a formação de quatro grupos distintos, nos quais o lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e lixiviado do ASMOC (Inóculo 4) estão localizados no quadrante superior e os lodos de tanque séptico (Inóculo 2) e reator UASB da ETE-Aracapé estão situados no quadrante inferior.

As variáveis que são responsáveis pela formação dos grupos podem ser visualizadas no diagrama de *loadings* (Figura 13B). Ao correlacionar ambos os diagramas se observa que as variáveis NTK, PT, ST e ST são responsáveis pela formação do grupo LUASBARA (Inóculo 1), por tanto este inóculo apresentou maior teor destes nutrientes e frações de sólidos que os demais, situando assim no quadrante superior à direita do gráfico. A formação do grupo LIX (Inóculo 3) ocorreu devido a maior influência das variáveis pH, AlcT e AGV, possuindo maior concentração destes do que as demais amostras, sendo localizados no quadrante superior à esquerda do gráfico.

Ainda correlacionando ambos os diagramas de ordenação das amostras (*scores*) e ordenação das variáveis (*loadings*), os grupos LUASBI (Inóculo 3) e LTS (Inóculo 2) se situam no quadrante inferior do diagrama em posições bem próximas. Sendo responsável pela posição um pouco a direita do grupo LUASBI a variável DQO e ao centro a variável PEL, possuindo este inóculo maior teor destes parâmetros em comparação aos demais. Já a posição do grupo LTS no quadrante inferior à esquerda, se deve a variável TU, possuindo esta amostra maior teor de umidade que os demais.

FIGURA 13- Análise de Componente Principal dos atributos físico-químicos: diagrama de ordenação das amostras (*scores*) e formação de grupos de amostras semelhantes (a) e diagrama de ordenamento das variáveis (*loadings*) (b) levando-se em consideração as componentes principais 1 e 2.



Fonte: AUTORA, 2015.

Na Figura (a) o primeiro número representa a diferenciação entre os inóculos e o segundo indica a sequência do resultado, realizado em duplicata. LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3); LIX: Lixiviado coletado no ASMOC (Inóculo 4).

## **5.2. Caracterização físico-química do substrato – FORSD**

Em diversas pesquisas relacionadas à digestão anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, os autores optam por utilizar uma fração orgânica de resíduos sólidos urbanos padronizados (FORSUP) proposto por Pinto (2000), conforme o quadro abaixo (Quadro 9). Nesta pesquisa optou-se por utilizar, meio da amostragem por quarteamento, uma fração orgânica mais próxima das condições encontradas em comunidades.

QUADRO 9 – Proposta de elaboração de uma Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão (FORSUP), referente a % em massa de cada elemento e categoria sugerido, segundo Pinto (2000).

Categoria	Elemento	% em massa da categoria na FORSUP	% em massa do componente na FORSUP
Frutas	Casca / Bagaço de Laranja		17,8
	Casca de Banana	30,00	3,8
	Pedaços de Tomate		4,6
	Casca de Melancia		3,8
	Casca de Batatas		5,5
Casca/ Pedaços de Cebolas	11,00		2,3
Casca de Abobrinhas		1,6	
Legumes Crus	Casca/ Pedaços de Mandioca		1,6
	Casca/ Pedaços de Batatas	4,00	1,3
Legumes Cozidos	Pedaços de Mandioca		
	Hortaliças	Alface	
Repolho		7,20	1,9
Couve-flor			1,5
Carne	Pele/ Pedaços de Frango Crus	2,00	1,3
	Pedaços de Carne de Boi Crus		0,7
Café	-	3,50	3,5
Folhas	Seca		9,2
	Verde	10,80	1,6
Queijo	-	0,4	0,4
Arroz	-	11,20	11,2
Feijão	-	4,70	4,7
Macarrão	-	2,20	2,2
Osso	Frango	1,80	1,8

---

Outros	Papel Úmido	8,20	5,0
	Casca de Ovos		3,2

---

Fonte: ADAPTADO DE PINTO (2000) *apud* BARCELOS (2009).

FORSUP: Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão.



Ao comparar as características físicas e químicas da fração orgânica utilizada nesta pesquisa com diversos estudos, conforme indicado na Tabela 9, nota-se algumas semelhanças e divergências.

TABELA 9 - Características físicas e químicas do substrato (fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares – FORSD) utilizado na pesquisa.

Variáveis	I	II	Média	DP
pH	4,71	4,72	-	0,01
TU (%)	81,2	81,7	81,47	0,40
ST (mg/Kg)	18820	18260	18540	395,98
STV (mg/Kg)	14780	9780	12280	3535,53
AlcT. (mg/Kg)	36,2	31,9	34,1	3,01
AGV (mg/Kg)	139,6	173,1	156,4	23,73
NTK (mg/Kg)	8168	8735	8452	400,52
PT (mg/Kg)	638	637	637	0,28
DQO (mg/Kg)	201600	223200	212400	15273,51

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio; FORSD: Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variância.

Quanto às frações de sólidos e teor de umidade da amostra de substrato trabalhada, com teor de umidade de 81,5 %, ST de 18,5% e STV de 12,3%, encontraram-se valores próximos aos apontados na literatura para o FORSUP. A Tabela 10, faz referência a estes parâmetros em outras pesquisas:

TABELA 10 – Levantamento dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e Teor de Umidade (TU) para as amostras de Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos Padrão (FORSUP) utilizados na literatura.

Referência	TU (%)	ST (%)	STV (%)
Barcelos (2009)	75,9	24,1	19,9
Carneiro (2005)	70,0	30,0	26,0
Gadelha (2005)	65,0	35,0	12,0
Picanço (2004)	81,0 / 69,0 / 75,0	19,0 / 28,0 / 25,0	16,0 / 23,0 / 20,0
Souto (2005)	70,0	30,0	26,0

Fonte: AUTORA, 2015.

TU: Teor de Umidade; ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis.

Em poucas pesquisas foram analisados mais amplamente as características físicas e químicas da fração orgânica, tais como pH, alcalinidade, ácidos orgânicos, fósforo, nitrogênio e DQO. A matéria orgânica no geral possui características ácidas, alto teor de alcalinidade, nutrientes e carga orgânica elevada, justificando os valores encontradas no substrato analisado, conforme Tabela 10.

### 5.3. Teste de atividade metanogênica específica – AME

Os inóculos avaliados durante o teste de AME apresentaram uma elevada atividade metanogênica para as mesmas condições, com exceção do inóculo 4. Em poucas horas os inóculos provenientes de lodos de ETEs (Inóculo 1, 2 e 3) apresentaram sua AME máxima e em questão de dias a produção de metano cessou.

Conforme apresentado na Tabela 11, houve uma maior atividade metanogênica para o inóculo 3, proveniente de uma indústria de cervejaria, com AME máxima de 0,80 g DQO/g STV.d, produção máxima de 21,98 mL de metano e apresentando cerca de 67% de metano presente no biogás. Acredita-se que isto se deve a maior adaptação dos microrganismos ao substrato presente mais especificamente aos sacarídeos, já que efluentes de cervejarias apresentam elevada quantidade deste composto.

TABELA 11- Resultados do teste de Atividade Metanogênica Específica (AME) para os inóculos utilizados.

Amostra	VCH <sub>4</sub> máximo (mL)	AME máximo (gDQO/gSV.d)	Biogás - % CH <sub>4</sub>
Inóculo 1	4,92	0,16	33,2
Inóculo 2	7,81	0,53	39,3
Inóculo 3	21,98	0,80	67,5
Inóculo 4	0,0714	0,0039	1,8

Fonte: AUTORA, 2015.

AME: Atividade Metanogênica Específica.

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 2: Lodo de Tanque Séptico; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; Inóculo 4: Lixiviado coletado no ASMOC.

O inóculo 4 apresentou baixíssima atividade metanogênica, acredita-se que algum componente oriundo do aterro sanitário inibiu a atividade dos microrganismos. Provavelmente a inibição ocorreu devido a elevados teores de metais pesados, que se

podem encontrar comumente nos resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários.

Devido à falta de padronização na literatura para execução do teste de AME, torna-se difícil comparar os valores encontrados com outras pesquisas. Nas mesmas condições, uma relação A/M de 0,5 e glicose como substrato, Machado (2012), Carneiro (2012) e Brauna (2012) para um inóculo proveniente de uma indústria de cervejaria, obtiveram, respectivamente, valores máximos de AME de 0,26, 0,63 e 1,49 g DQO/g STV.d, próximo da concentração encontrada nesta pesquisa. Os autores também obtiveram a produção máxima de AME em poucas horas e a produção de metano cessou em poucos dias.

### 5.3.1. Aplicando regressão não-linear – Função Sigmoidal.

Utilizou-se a regressão não-linear na avaliação do teste de atividade metanogênica específica para cada inóculo estudado, assim ajustando os dados de produção de metano acumulado aos modelos de funções sigmoidais escolhidas.

Ao sumarizar a produção de metano acumulado para o Inóculo 1, conforme Tabela 12, foi alcançado no período de 1,0 dia uma produção máxima de 4,92 mL. Portanto, aplicando a regressão não-linear para estes dados, conforme Figura 14, e segundo observa-se na Tabela 13, utilizando como critério de seleção para o melhor ajuste o erro padrão residual, opta-se pelo modelo de Morgan-Mercer-Flodin (MMF).

TABELA 12- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Especifica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé).

Tempo (dia)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	0,45
0,02	0,53
0,04	0,60
0,06	0,75
0,08	0,89
0,10	1,05
0,13	1,26
0,17	1,90
0,21	2,53
0,25	3,33
0,29	3,73
0,33	3,77

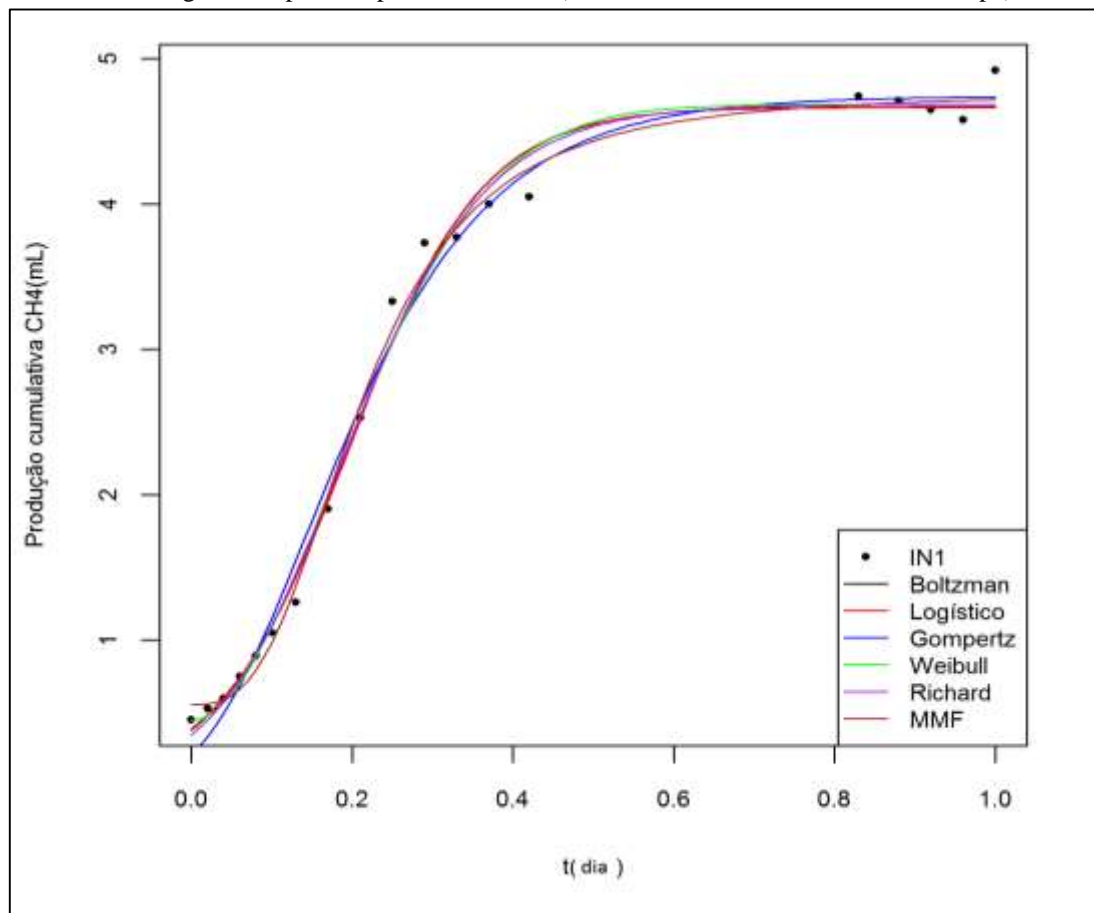
---

0,37	4,00
0,42	4,05
0,83	4,58
0,88	4,65
0,92	4,71
0,96	4,74
1,00	4,92

---

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 14- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé).



Fonte: AUTORA, 2015.

TABELA 13- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé).

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 4,666543$	0,069477	0,1593
	$\beta = 0,195987$	0,012057	
	$\gamma = 0,083122$	0,008763	
	$\delta = -4,690034$	0,259641	
Weibull	$\alpha = 4,68304$	0,07015	0,1594
	$\beta = 0,44765$	0,09362	
	$\gamma = 13,42249$	2,92249	
	$\delta = 1,90889$	0,15769	
Richards	$\alpha = 4,68492$	0,06968	0,1559
	$\beta = 4,98061$	5,24331	
	$\gamma = 10,74185$	1,71600	
	$\delta = 0,68750$	0,38298	
<b>MMF</b>	$\alpha = 4,765570$	0,067901	<b>0,1284</b>
	$\beta = 0,555005$	0,066342	
	$\gamma = 0,011692$	0,003833	
	$\delta = 2,87762$	0,211064	
Gompertz	$\alpha = 4,74053$	0,07855	0,1759
	$\beta = 3,09336$	0,22632	
	$\gamma = 7,82570$	0,47013	
Logístico	$\alpha = 4,66425$	0,06544	0,1543
	$\beta = 10,95112$	1,30739	
	$\gamma = 12,15108$	0,64124	

Fonte: AUTORA, 2015.

Por meio do cálculo do ponto de inflexão e a máxima taxa de variação de produção de metano, para o modelo de MMF, segundo Tabela 14, ao avaliar estes resultados para o Inóculo 1, foi identificado que no decorrer de 0,17 dias com uma produção cumulativa de metano de 14,35 mL houve uma máxima taxa de variação de 16,08 mL/dia. Identificando que esse momento, na qual a derivada da função sigmoideal passa a ter concavidade para baixo, é o ideal para realizar uma alimentação do reator, a suprir a necessidade dos microrganismos e impulsionar a produção de metano.

TABELA 14- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé).

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	t	y	
Boltzman	0,20	2,32	28,21
Weibull	0,17	0,72	13,75
Richards	0,18	2,19	13,93
<b>MMF</b>	<b>0,17</b>	<b>14,37</b>	<b>16,08</b>
Gompertz	0,14	1,74	13,65
Logístico	0,20	2,33	28,34

Fonte: AUTORA, 2015.

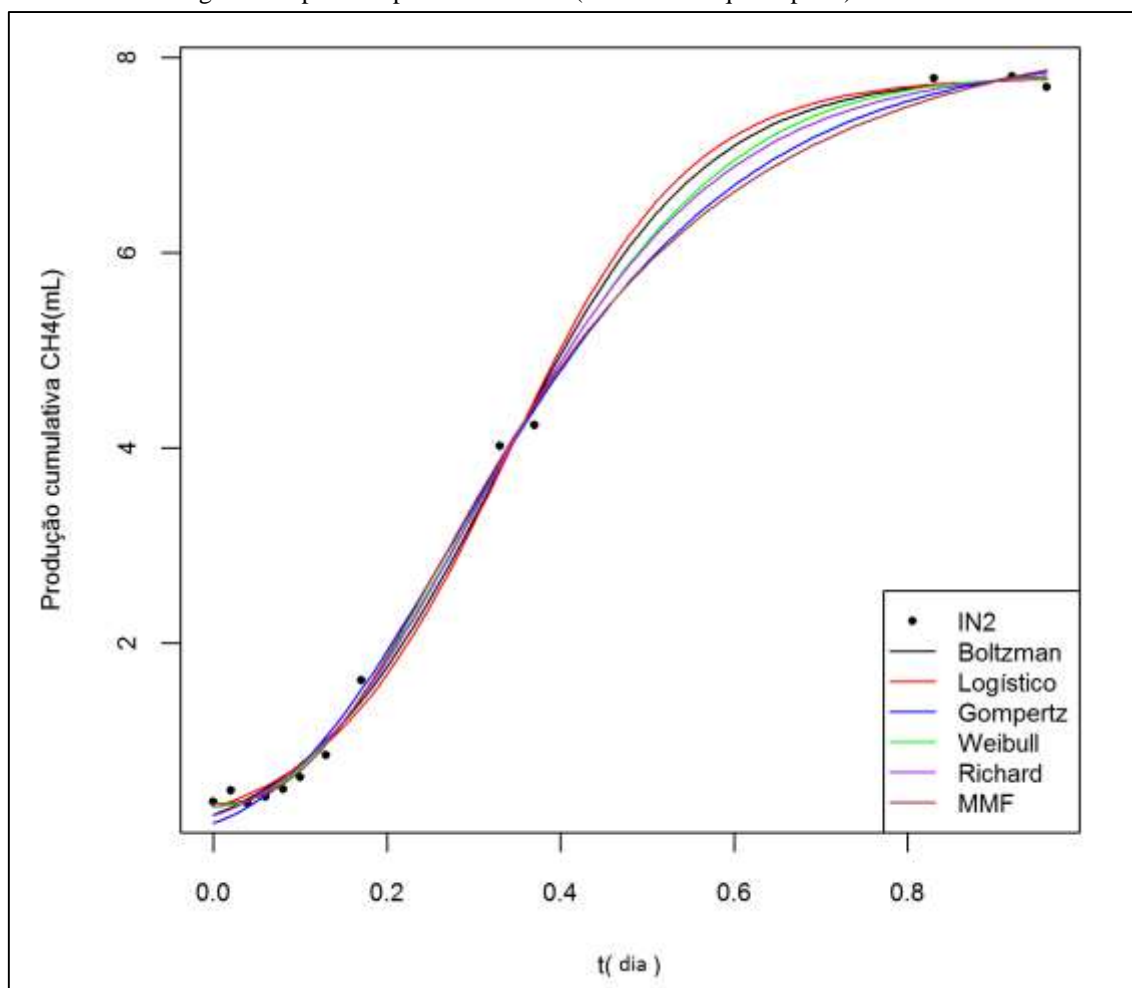
A produção de metano para o inóculo 2 chegou ao máximo no período de 0,92 dia com um volume de 7,81 mL, conforme Tabela 15. Aplicando a regressão não-linear para estes dados, conforme Figura 15, e de acordo com o critério de seleção, segundo Tabela 16, tem-se como melhor ajuste o modelo de Weibull.

TABELA 15- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Especifica do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico).

Tempo (dia)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	0,35
0,02	0,49
0,04	0,42
0,06	0,49
0,08	0,50
0,10	0,62
0,13	0,85
0,17	1,62
0,21	2,83
0,25	3,97
0,29	4,02
0,33	4,02
0,37	4,23
0,42	4,26
0,83	5,10
0,88	7,79
0,92	7,81

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 15- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica para o Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico).



Fonte: AUTORA, 2015.



TABELA 16- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico).

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 7,82572$	0,11766	0,1809
	$\beta = 0,33178$	0,01137	
	$\gamma = 0,11642$	0,0161	
	$\delta = -8,02891$	0,35443	
<b>Weibull</b>	$\alpha = 7,82174$	0,10451	<b>0,1469</b>
	$\beta = 0,32252$	0,0805	
	$\gamma = 6,13918$	1,22615	
	$\delta = 2,05470$	0,17665	
Richards	$\alpha = 7,9277$	0,1855	0,1696
	$\beta = 2,4881$	4,6665	
	$\gamma = 6,4800$	1,7898	
	$\delta = 0,3521$	0,4076	
MMF	$\alpha = 8,67337$	0,29913	0,1527
	$\beta = 0,34994$	0,08066	
	$\gamma = 0,09639$	0,02993	
	$\delta = 2,38743$	0,2286	
Gompertz	$\alpha = 8,0993$	0,1393	0,1723
	$\beta = 3,9602$	0,233	
	$\gamma = 5,0540$	0,2765	
Logístico	$\alpha = 7,8006$	0,1066	0,178
	$\beta = 24,0237$	3,4467	
	$\gamma = 9,4247$	0,4922	

Fonte: AUTORA, 2015.

Identifica-se por meio do ponto de inflexão da curva para modelo de Weibull de (0,30; 0,54), avaliando os resultados do Inóculo 2, segundo Tabela 17, que no decorrer de 0,30 dias com uma produção cumulativa de metano de 0,54 mL houve uma máxima taxa de variação de 115,84 mL/dia. Portanto, neste ponto (0,30; 0,54) a derivada da função sigmoideal passa a ter concavidade para baixo, sendo o ideal para realizar uma alimentação do reator.

TABELA 17- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 2 (Lodo de Tanque Séptico).

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	t	y	
Boltzman	0,33	3,81	34,48
<b>Weibull</b>	<b>0,30</b>	<b>0,54</b>	<b>15,84</b>
Richards	0,30	3,37	16,13
MMF	0,26	14,94	15,86
Gompertz	0,27	2,98	15,06
Logístico	0,34	3,90	36,76

Fonte: AUTORA, 2015.

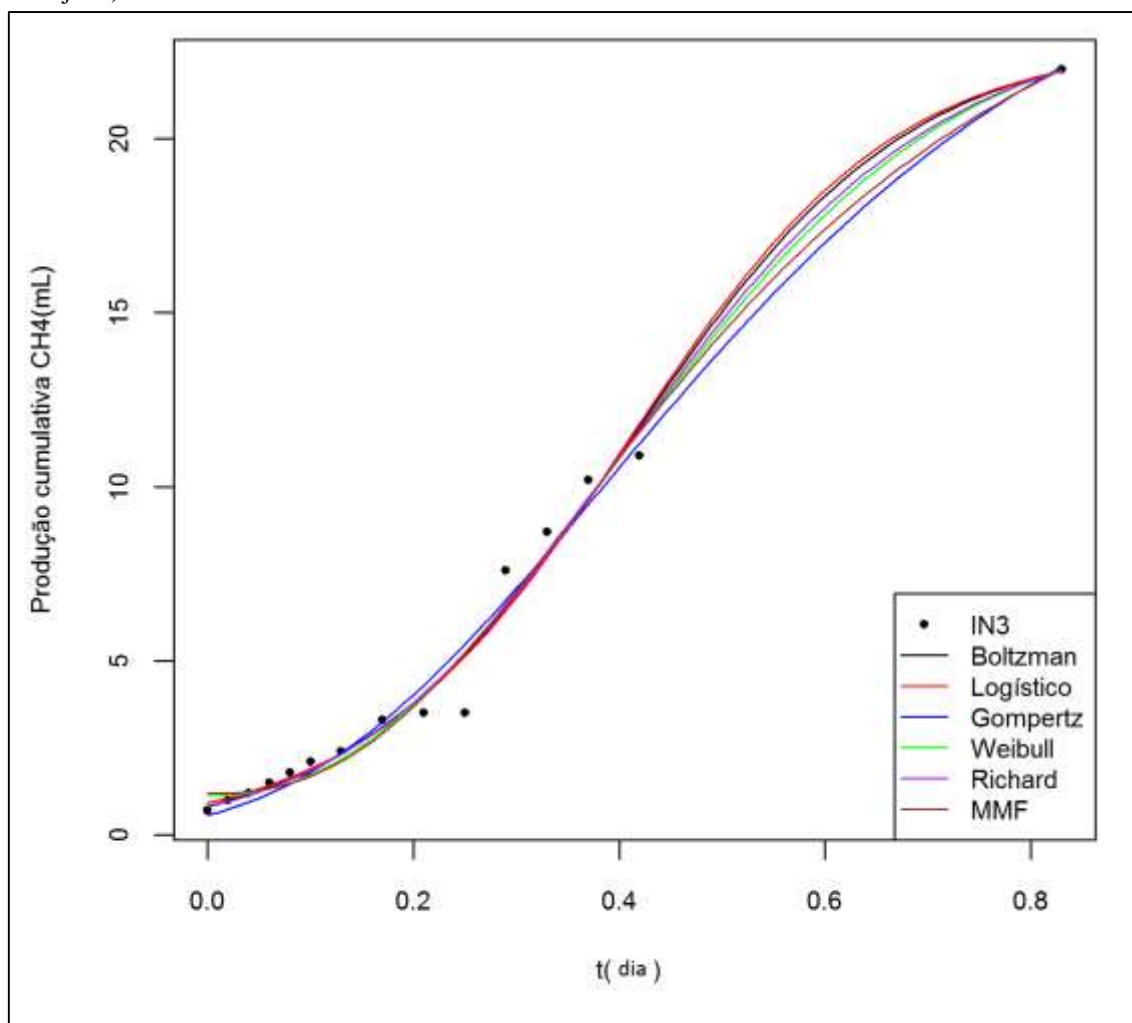
O inóculo 3 apresentou uma maior produção de metano em período mais curto ao comparar com os outros inóculos estudados, com um volume máximo de metano de 21,98 mL no período de 0,83 dia (Tabela 18). Aplicando a regressão não-linear para estes dados, conforme Figura 16, e segundo Tabela 19, tem-se como melhor ajuste o modelo Logístico por apresentar um menor erro padrão residual.

TABELA 18- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Específica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria).

Tempo (dia)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	0,7
0,02	1,0
0,04	1,2
0,06	1,5
0,08	1,8
0,10	2,1
0,13	2,4
0,17	3,3
0,21	3,5
0,25	3,5
0,29	7,6
0,33	8,7
0,37	10,2
0,42	10,9
0,83	22,0

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 16- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria).



Fonte: AUTORA, 2015.

TABELA 19- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria).

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 22,96334$	1,88597	2,726
	$\beta = 0,41114$	1,17187	
	$\gamma = 0,13549$	0,0178	
	$\delta = -23,19640$	0,02674	
Weibull	$\alpha = 23,2460$	1,7789	2,728
	$\beta = 1,1286$	0,3550	
	$\gamma = 4,3061$	1,8433	
	$\delta = 2,1945$	0,3353	
Richards	$\alpha = 23,5427$	2,3494	2,725
	$\beta = 7,5437$	19,6037	
	$\gamma = 6,1684$	3,2431	
	$\delta = 0,6381$	0,7535	
MMF	$\alpha = 28,3132$	3,9502	2,740
	$\beta = 1,1948$	0,3460	
	$\gamma = 0,1933$	0,1232	
	$\delta = 2,4445$	0,4274	
Gompertz	$\alpha = 27,1813$	2,1000	2,752
	$\beta = 3,8612$	0,2763	
	$\gamma = 3,5152$	0,3954	
<b>Logístico</b>	$\alpha = 22,7984$	0,8861	<b>2,702</b>
	$\beta = 23,7719$	4,1601	
	$\gamma = 7,7204$	0,6112	

Fonte: AUTORA, 2015.

Com o ponto de inflexão (0,41; 11,40), conforme Tabela 20, para o modelo Logístico com menor erro padrão residual, ao avaliar os resultados do Inóculo 3, teve-se no decorrer de 0,41 dias uma produção cumulativa de metano de 11,40 mL houve e uma máxima taxa de variação de 88,01 mL/dia, sendo o momento ideal para suprir a necessidade dos microrganismos e impulsionar a produção de metano.

TABELA 20- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria).

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	t	y	
Boltzman	0,41	11,37	85,60
Weibull	0,39	1,95	39,34
Richards	0,40	10,86	40,91
MMF	0,36	52,10	38,57
Gompertz	0,38	10,00	35,15
<b>Logístico</b>	<b>0,41</b>	<b>11,40</b>	<b>88,01</b>

Fonte: AUTORA, 2015.

Conforme discutido no item anterior, o inóculo 4 obteve uma baixa produção de metano devido algum efeito inibidor, chegando somente a uma produção máxima de 0,0714 mL no período de 1,13 dias, conforme Tabela 21. Devido a essa baixa produção, não foi possível aplicar a regressão não-linear para estes dados.

TABELA 21- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de Atividade Metanogênica Especifica do Inóculo 4 (Lixiviado coletado no ASMOC).

Tempo (dias)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	0,0770
0,02	0,0082
0,04	0,0091
0,06	0,0096
0,08	0,0098
0,10	0,0098
0,13	0,0099
0,17	0,0100
0,21	0,0101
0,25	0,0103
0,29	0,0112
0,33	0,0112
0,37	0,0112
0,42	0,0112
0,83	0,0144
0,88	0,0158
0,92	0,0179
0,96	0,0223
1,00	0,0303
1,04	0,0487
1,08	0,0685
1,13	0,0714

Fonte: AUTORA, 2015.

## 5.4. Teste de biodegradabilidade

Conforme o desempenho da atividade metanogênica dos microrganismos, produção e composição de biogás, além da viabilidade e similaridade entre os inóculos, na fase anterior da pesquisa, optou-se por realizar o teste de biodegradabilidade somente com o inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) e inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria).

### 5.4.1. Caracterização dos meios de reações no início do teste:

Os parâmetros analisados dos meios de reações, antes da execução do teste, podem mostrar um meio favorável ou não ao desenvolvimento dos microrganismos formadores de metano.

O pH encontrado nos meios de reações (Tabela 22) são favoráveis aos organismos formadores de metanos. Segundo Chenicharo (2007) os microrganismos produtores de metanos podem conseguir uma estabilidade no seu crescimento numa faixa ampla de pH entre 6,0 e 8,0, e valores abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados.

Altos índices de alcalinidade, como apresentado nos meios de reações do inóculo 3, conforme indicado na Tabela 22, tendem a favorecer o tamponamento do meio e evitar quedas bruscas de pH. As quedas bruscas do pH podem favorecer o acúmulo dos ácidos graxos voláteis, dificultando a atividade dos microrganismos metanogênicos. Os índices de ácidos graxos voláteis (AGV), quando não estão presentes numa faixa entre 3,5 e 5,75, pouco influenciam no processo de digestão anaeróbia (CHENICHARO, 2007).

TABELA 22 – Resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT), Ácidos Graxos Voláteis (AGV) e relação AGV/ALcT para os meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade.

Amostras – Iniciais	Resultados			
	pH	AlcT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	AGV (mg HAc/L)	AGV/AlcT
Inóculo 1 A/M = 0,5	8,33	1509,1	555,4	0,37
Inóculo 1 A/M = 1,0	7,97	1610,0	461,7	0,29
Inóculo 3 A/M = 0,5	7,98	9103,9	3554,8	0,39
Inóculo 3 A/M = 1,0	7,90	6124,4	3219,1	0,53

Fonte: AUTORA, 2015.

AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis.

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

Leite (2004) aponta uma relação AGV/AT inferior ou igual a 0,50 como um sistema com uma boa capacidade de tamponamento. Em sistemas anaeróbios, uma relação AGV/AT próxima de 0,50 indica um equilíbrio dinâmico ao sistema. O inóculo 1 para as duas relações A/M apresentou valores abaixo de 0,50 para relação AGV/AT. Já o inóculo 3, somente a relação A/M de 1,0 apresentou valor um pouco superior a 0,50, conforme a tabela acima (Tabela 22).

Quanto ao teor de sólidos presentes nos meios de reações, podemos avaliar por meio das relações STV/ST a predominância de material orgânico e uma consequente biodegradabilidade. Conforme observado na Tabela 23, as amostras apresentaram relações STV/ST próximos de 0,50, apresentando valores pouco mais elevados para as relações A/M de 1,0.

TABELA 23 – Resultados para os parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV) e relação STV/ST dos meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade.

Amostras – Iniciais	Resultados		
	ST (mg/L)	STV (mg/L)	STV/ST
Inóculo 1 A/M = 0,5	15170	7330	0,48
Inóculo 1 A/M = 1,0	14530	8740	0,60
Inóculo 3 A/M = 0,5	25660	12350	0,48
Inóculo 3 A/M = 1,0	14160	7050	0,50

Fonte: AUTORA, 2015.

ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis.

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

A literatura recomenda uma relação DQO:N:P da ordem de 350:7:1 para sistemas anaeróbios (PIVELI, 2000). Dentre os meios de reações estudados, conforme mostra a Tabela 24, encontraram-se relações com pouca concentração de fósforo e altos índices de nitrogênios. Sendo que o nitrogênio na sua forma livre, nitrogênio amoniacal, pode ser tóxico aos microrganismos, e a presença de fósforo é essencial ao crescimento dos microrganismos.

TABELA 24 – Resultados dos parâmetros Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK), Fósforo Total (PT), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e relação DQO:N:P dos meios de reações analisados antes da execução do teste de biodegradabilidade.

Amostras – Iniciais	Resultado			
	NTK (mg N/L)	PT (mg PO <sub>4</sub> /L)	DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	DQO:N:P
Inóculo 1 A/M = 0,5	3329,3	110,6	19960	554:92:1
Inóculo 1 A/M = 1,0	825,2	85,1	5760	206:29:1
Inóculo 3 A/M = 0,5	825,2	156,1	12710	249:16:1
Inóculo 3 A/M = 1,0	540,7	36,1	8360	697:41:1

Fonte: AUTORA, 2015.

NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; P: Fósforo; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio. Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

O meio de reação do inóculo 3 para relação A/M de 0,5, obteve uma relação mais próxima a indicada na literatura. Encontrando uma elevada carga orgânica para os meios de reações do inóculo 1 para a relação A/M de 0,5 e inóculo 3 para relação A/M de 1,0.

#### 5.4.2. Caracterização dos meios de reações no final do teste:

Os parâmetros analisados dos meios de reações, após a execução do teste, podem mostrar a remoção de matéria orgânica, além da interação da alcalinidade e ácidos graxos voláteis essenciais ao equilíbrio do sistema.

A presença de alcalinidade presente nos meios de reações do inóculo 1, não foi suficiente para o tamponamento do sistema, havendo conseqüente acúmulo de AGV para ambas relações A/M, podendo causar uma inibição dos microrganismos formadores de metano. Já para os meios de reações do inóculo 3, houve uma baixa produção de AGV para todas as relações A/M, conforme observado na Tabela 25.

TABELA 25 – Comparação entre os resultados dos parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) dos meios de reações analisados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade.

Amostras	Resultados					
	pH		AlcT (mg CaCO <sub>3</sub> /L)		AGV (mg HAc/L)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Inóculo 1 A/M = 0,5	8,33	7,98	1509,1	3011,9	555,4	1379,1
Inóculo 1 A/M = 1,0	7,97	8,03	1610,0	1877,9	461,7	706,5
Inóculo 3 A/M = 0,5	7,98	7,70	9103,9	2153,4	3554,8	368,1



Inóculo 3 A/M = 1,0	7,90	7,68	6124,4	1469,2	3219,1	225,1
---------------------	------	------	--------	--------	--------	-------

Fonte: AUTORA, 2015.

AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis.

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

Os índices de remoções de matéria orgânica foram avaliados a partir do consumo de DQO e ST. As eficiências de remoções para este parâmetro em relação aos meios de reações trabalhados, conforme indicado na Tabela 26, foram abaixo do encontrado na literatura para sistemas semelhantes, Reis (2012) obteve uma eficiência máxima de remoção de 71% para DQO e 80% para ST.

TABELA 26 – Comparação entre os resultados dos parâmetros Sólidos Totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a eficiência de remoção, para os meios de reações analisados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade.

Amostras	Resultados								
	ST (mg/L)		STV (mg/L)		DQO (mg O <sub>2</sub> /L)		Eficiência de remoção (%)		
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	ST	STV	DQO
Inóculo 1 A/M = 0,5	15170	9340	7330	5200	19960	3660	38,4	29,1	81,7
Inóculo 1 A/M = 1,0	14530	5080	8740	5080	5760	5160	65,0	41,9	10,4
Inóculo 3 A/M = 0,5	25660	19950	12350	8600	12710	11900	22,3	30,4	6,4
Inóculo 3 A/M = 1,0	14160	9090	7050	3700	8360	8067	35,8	47,5	3,5

Fonte: AUTORA, 2015.

ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

Obteve-se apenas uma ótima remoção de DQO e ST para o meio de reação do inóculo 1 para relação A/M de 0,5, com eficiência de remoção de 81,7% para DQO e 38,4% para ST. Contudo, ao apresentar os resultados de produção de metano no tópico posterior, será observado uma baixa produção deste. Assim, indicando que grande parte do biogás produzido a partir da metabolização da matéria orgânica está composto por CO<sub>2</sub> e outros subprodutos da digestão anaeróbia. Acredita-se que isso ocorreu devido ao acúmulo de AGV, observado na Tabela 26, o qual o meio não propicia para atividade metanogênica dos microrganismos presentes.

Os meios de reações do inóculo 3 tiveram consideráveis índices de remoção para ST, indicando eficiência na hidrólise do material sólido desses sistemas, o qual se encontram em elevado teor em amostras de resíduos sólidos orgânicos.

Os resultados indicam uma necessidade monitoramento frequente dos parâmetros, assim ao detectar sistema não favorável aos microrganismos metanogênicos, pode-se suprir as suas necessidades o durante o processo de digestão anaeróbio em um reator. Conseqüentemente, pode-se obter aumento nos índices de remoções de matéria orgânica e maior produção de metano.

#### 5.4.3. Interpretando os resultados por meio do diagrama de caixas ou box-plot.

Utilizou-se também o auxílio do diagrama de caixas para avaliar os resultados da caracterização dos meios de reações antes e depois do teste de biodegradabilidade. Permitindo verificar principalmente a posição, dispersão e assimetria dos resultados. Ressaltando novamente, que os resultados foram obtidos a partir de uma coleta única e análises em duplicata, influenciando assim diretamente nas suas características.

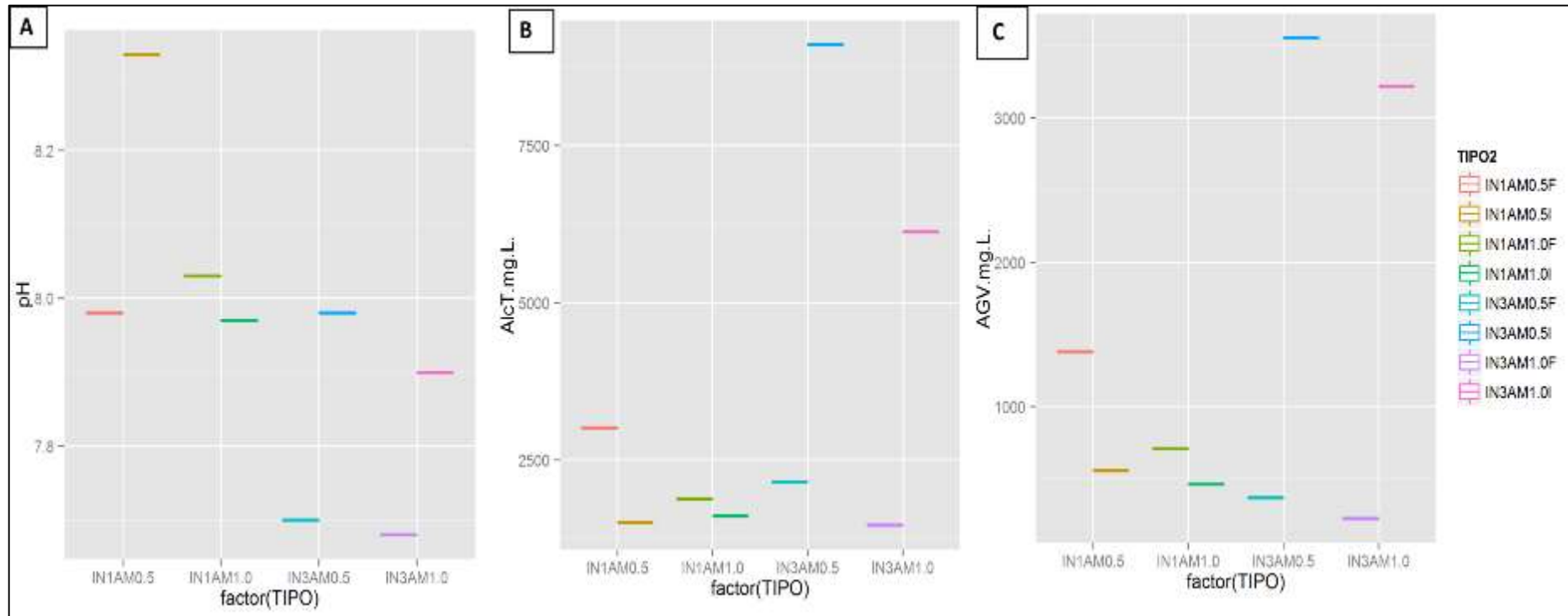
Ao avaliarmos os parâmetros o pH, alcalinidade total e AGV os seus resultados não apresentaram dispersão e possuem simetria (Figura 17). Observando melhor com a ajuda do diagrama, o comportamento dos resultados antes e depois do teste. Detectou-se um pequeno decréscimo ao final do teste no valor do pH, com exceção do meio de reação preparado a partir do Inóculo 1 para a relação A/M de 1,0, o qual se manteve quase constante (Figura 17A).

Quanto à alcalinidade e AGV, pode se observar a produção de alcalinidade e acúmulo de AGV para o meio de reação formado a partir do Inóculo 1 para ambas as relações A/M. Havendo um consumo de alcalinidade e AGV para o outro meio de reação (Inóculo 3) para ambas relações A/M (Figura 17B e 17C).

Ao avaliar as características dos resultados para os parâmetros ST e STV, verificou-se a existência de simetria e dispersão (Figura 18). Os resultados obtidos, tanto para ST e STV, após a realização do teste de biodegradabilidade apresentaram menor dispersão em comparação aos caracterizados no início. Já comparando a dispersão dos resultados entre ST e STV, este último apresentou maior dispersão. Essa característica era esperada, devido ser uma análise gravimétrica, estando sujeita a mais erros analíticos.

Pode se observar melhor por meio do box-plot a remoção dos ST e STV voláteis em consequência do teste (Figura 18A e 18B). Notando-se pouca remoção para estes parâmetros em todos os meios de reações avaliados.

FIGURA 17- Box-plot com percentis de 25% e 75% para os parâmetros pH, Alcalinidade Total (AlcT) e Ácidos Graxos Voláteis (AGV) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade.

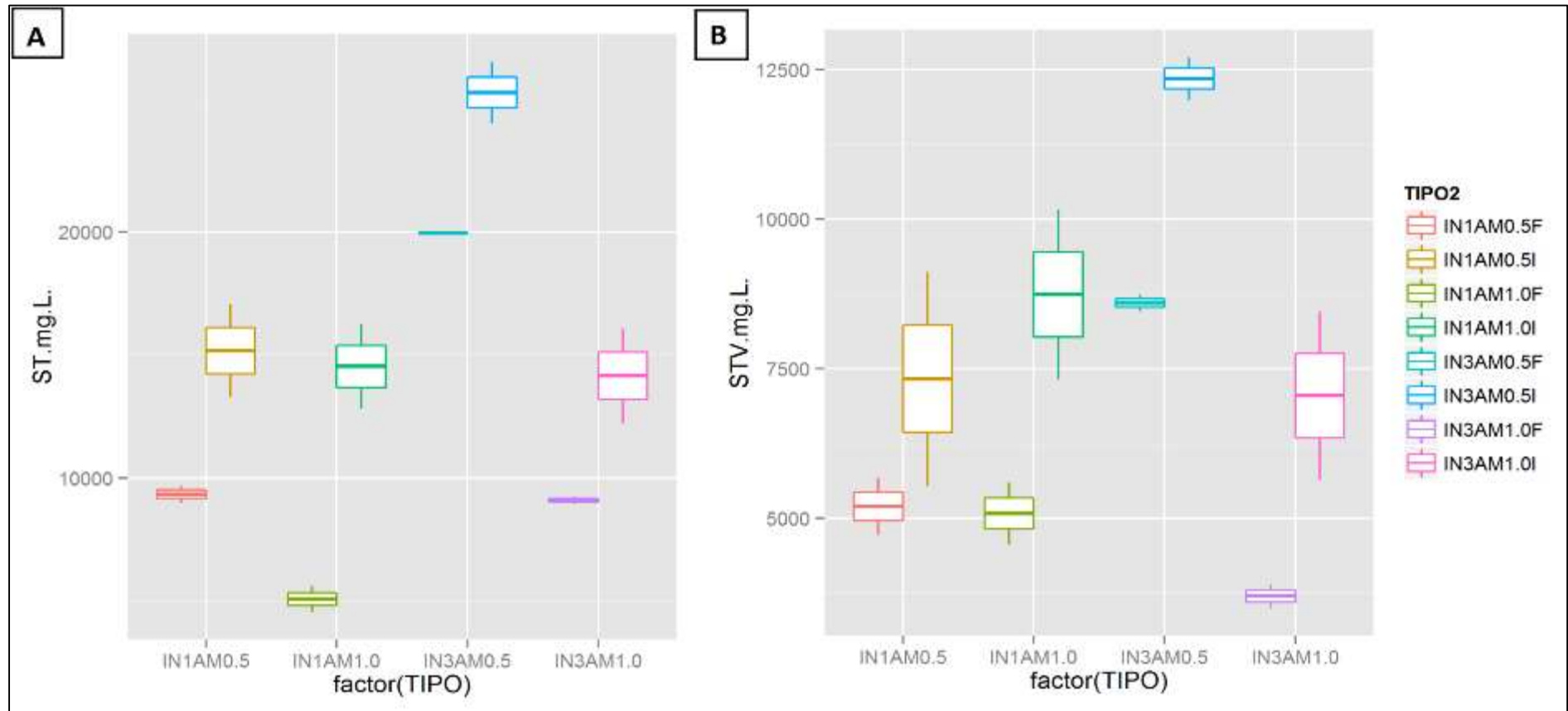


Fonte: AUTORA, 2015.

A: Diagrama de Caixas para pH; B: Diagrama de Caixas para AlcT; C: Diagrama de Caixas para AGV. AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis.

IN1AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade. IN1AM0,5I: Inóculo 1, relação A/M de 0,5 e caracterizados antes do teste; IN1AM1,0F: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN1AM1,0I: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste. IN3AM0,5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade; IN3AM0,5I: Inóculo 3, relação A/M de 0,5 e caracterizado antes do teste; IN3AM1,0F: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN3AM1,0I: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste.

FIGURA 18- Box-plot com percentis de 25% e 75% para os parâmetros Sólidos Totais (ST) e Sólidos Totais Voláteis (STV) dos meios de reações caracterizados antes e após a execução do teste de biodegradabilidade.



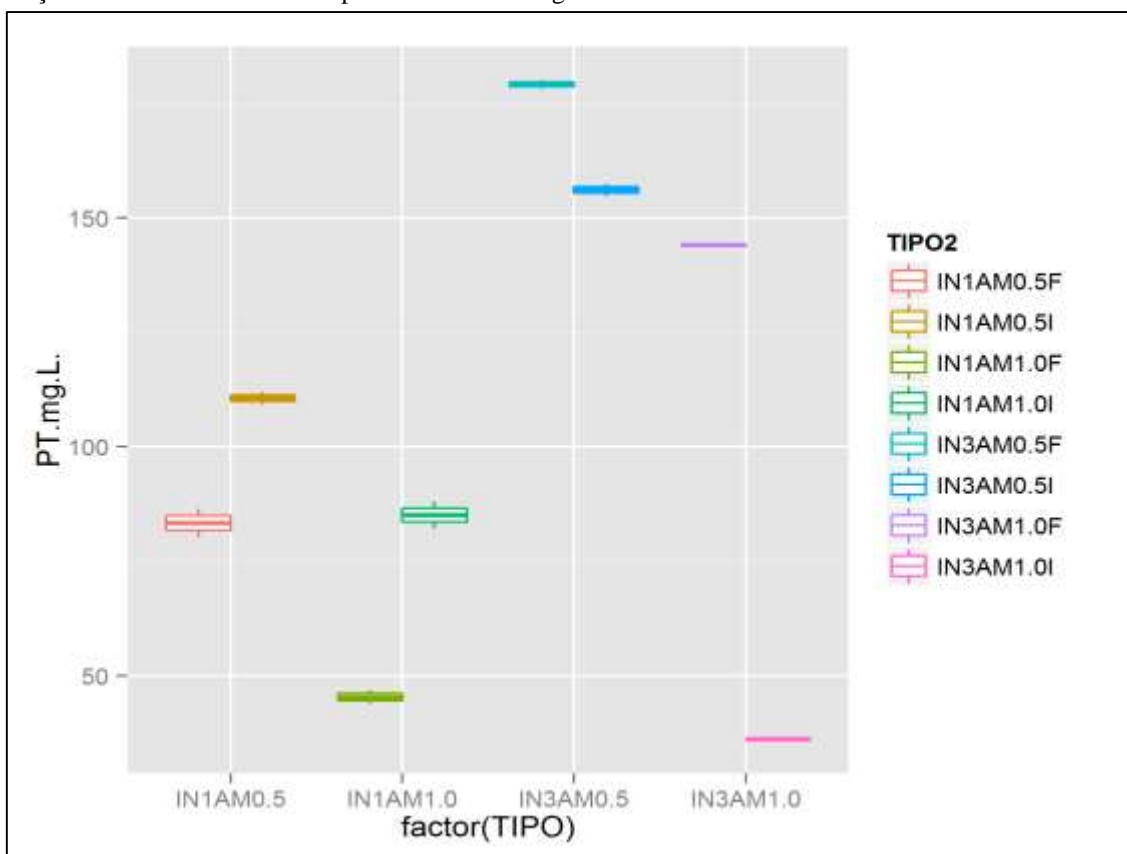
Fonte: AUTORA, 2015.

A: Diagrama de Caixas para ST; B: Diagrama de Caixas para STV. ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis.

IN1AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade. IN1AM0.5I: Inóculo 1, relação A/M de 0,5 e caracterizados antes do teste; IN1AM1.0F: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN1AM1.0I: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste. IN3AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade; IN3AM0.5I: Inóculo 3, relação A/M de 0,5 e caracterizado antes do teste; IN3AM1.0F: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN3AM1.0I: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste.

Os resultados obtidos para o fósforo total apresentaram simetria e pouca dispersão (Figura 19). Podem-se justificar estas características por ser uma análise espectrofotométrica com preparação de uma curva de calibração, assim havendo uma minimização dos erros. Observa-se por meio do box-plot em grande parte dos meios de reações analisados um consumo ou manutenção do PT existente, com exceção do meio de reação preparado a partir do Inóculo 3 com uma relação A/M de 1,0.

FIGURA 19- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Fósforo Total (PT) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade.



Fonte: AUTORA, 2015.

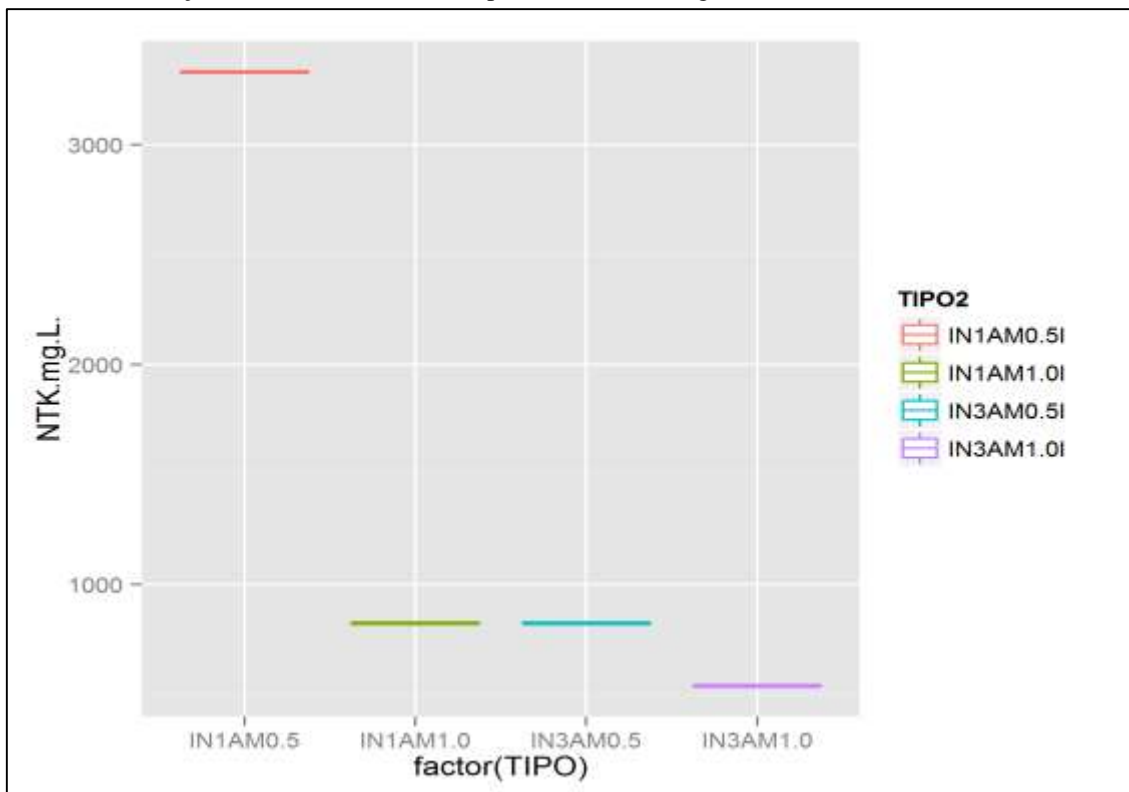
PT: Fósforo Total

IN1AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade. IN1AM0.5I: Inóculo 1, relação A/M de 0,5 e caracterizados antes do teste; IN1AM1.0F: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN1AM1.0I: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste. IN3AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade; IN3AM0.5I: Inóculo 3, relação A/M de 0,5 e caracterizado antes do teste; IN3AM1.0F: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN3AM1.0I: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste.

Os resultados apresentaram simetria e ausência de dispersão (Figura 20). Observa-se por meio do diagrama uma variação no teor de NTK para a maioria dos meios de reações preparados entre 500 a 900 mg/L, com exceção no meio de reação

produzido a partir do Inóculo 1 com uma relação A/M de 0,5 apresentando uma elevada concentração de NTK.

FIGURA 20- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Nitrogênio Total Kjeldhal (NTK) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade.



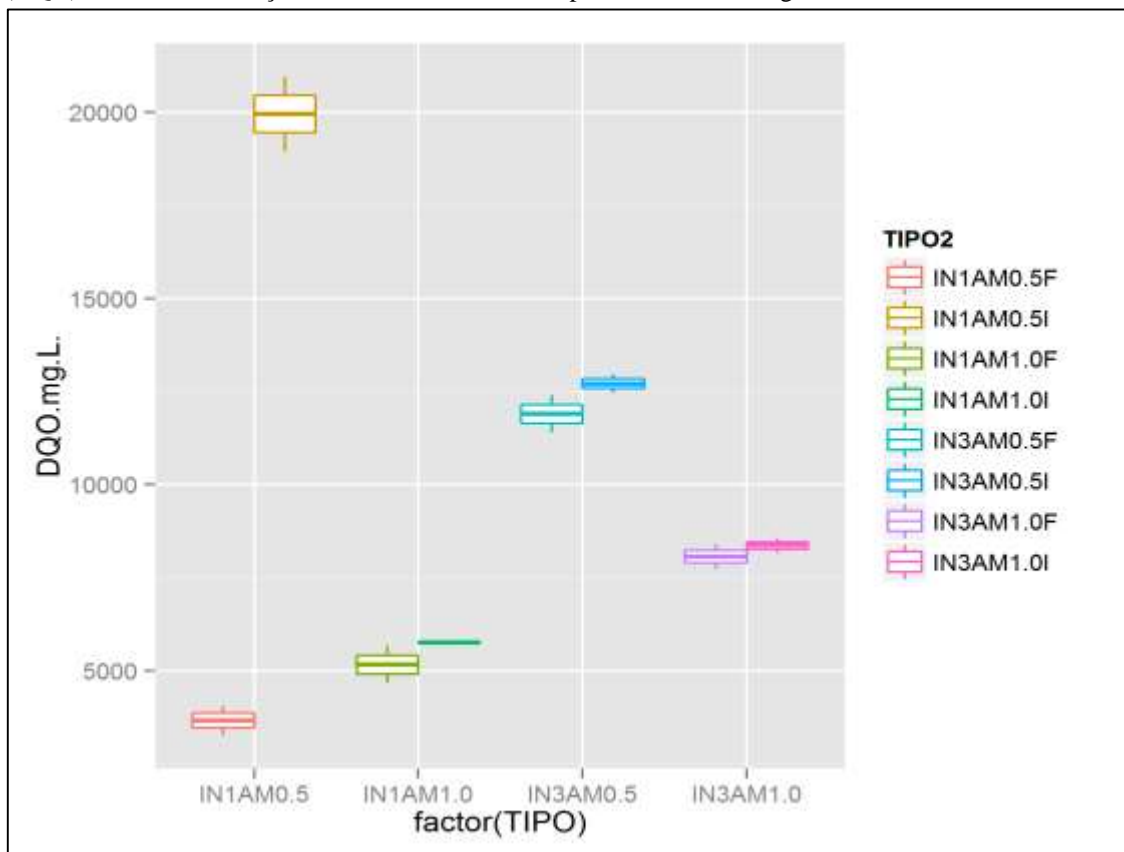
Fonte: AUTORA, 2015.

NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl;

IN1AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade. IN1AM0,5I: Inóculo 1, relação A/M de 0,5 e caracterizados antes do teste; IN1AM1,0F: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN1AM1,0I: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste. IN3AM0,5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade; IN3AM0,5I: Inóculo 3, relação A/M de 0,5 e caracterizado antes do teste; IN3AM1,0F: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN3AM1,0I: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste.

Os resultados de DQO analisados apresentaram simetria e pouca dispersão, também se justifica por ser um método espectrofotométrico (Figura 21). Observa-se pelo diagrama uma remoção de DQO, não tão significativa quanto se esperava. Havendo uma maior remoção de DQO para o meio de reação formado a partir do Inóculo 1 com relação A/M de 1,0.

FIGURA 21- Box-plot com percentis de 25% e 75% para o parâmetro Demanda Química de Oxigênio (DQO) dos meios de reações caracterizados antes e após o teste de biodegradabilidade.



Fonte: AUTORA, 2015.

DQO: Demanda Química de Oxigênio.

IN1AM0.5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade. IN1AM0,5I: Inóculo 1, relação A/M de 0,5 e caracterizados antes do teste; IN1AM1,0F: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN1AM1,0I: Inóculo 1, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste. IN3AM0,5F: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), relação alimento/microrganismo (A/M) de 0,5 e caracterizado depois do teste de biodegradabilidade; IN3AM0,5I: Inóculo 3, relação A/M de 0,5 e caracterizado antes do teste; IN3AM1,0F: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado depois do teste. IN3AM1,0I: Inóculo 3, relação A/M de 1,0 e caracterizado antes do teste.

#### 5.4.4. Aplicando ANOVA e TUKEY.

Também se aplicou análise de variância para comparar as médias de cada parâmetro dos meios de reações estudados, assim detectando a existência de diferenças entre os mesmos. Os resultados estatísticos obtidos por meio da ANOVA para os meios de reações caracterizados antes da realização do teste de biodegradabilidade constam na Tabela 27.

TABELA 27- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos realizados na caracterização dos meios de reações antes do teste de biodegradabilidade, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos.

Tabela da ANOVA	Soma quadrado	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
pH	0,224	0,07473	8,02E+28	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
AlcT	82203233	27401078	7,49E+32	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
AGV	16691991	5563997	4,43E+31	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
ST	183866800	61288933	10,41	0,0232
Resíduo	23540400	5885100		
STV	35622550	11874183	3,239	0,143
Resíduo	14662200	3665550		
NTK	10239506	3413169	2,48E+31	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
PT	15044	5015	805,8	5,11E-06
Resíduo	25	6		
DQO	231373750	77124583	139,9	0,000167
Resíduo	2205000	551250		

Fonte: AUTORA, 2015.

ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio;

Considerando o nível de significância igual a 5%, conforme a Tabela 27, somente não foi rejeitada a hipótese de igualdade entre a média do parâmetro sólidos totais voláteis (STV). Aplicando também o Teste de Tukey para avaliar as diferenças encontradas para cada parâmetro analisado, com intervalo de confiança de 95%.

Confirmando a hipótese de igualdade para o STV a partir do ANOVA, no qual o p-valor foi igual a 0,143, para este parâmetro ao aplicar o teste de Tukey nenhum dos intervalos de confiança apresentaram diferença entre as médias analisadas, considerando o nível de significância de 5%, conforme Tabela 28 e Figura 22.

TABELA 28- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias para o parâmetro Sólidos Totais Voláteis (STV) entre amostras dos meios de reações caracterizados antes do teste de biodegradabilidade.

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	1.410	-6.383,907	9.203,907	0,8781361
IN3_0.5I-IN1_0.5I	5.020	-2.773,907	12.813,907	0,1769624
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-280	-8.073,907	7.513,907	0,9986982
IN3_0.5I-IN1_1.0I	3.610	-4.183,907	11.403,907	0,3592421
IN3_1.0I-IN1_1.0I	-1.690	-9.483,907	6.103,907	0,8148144



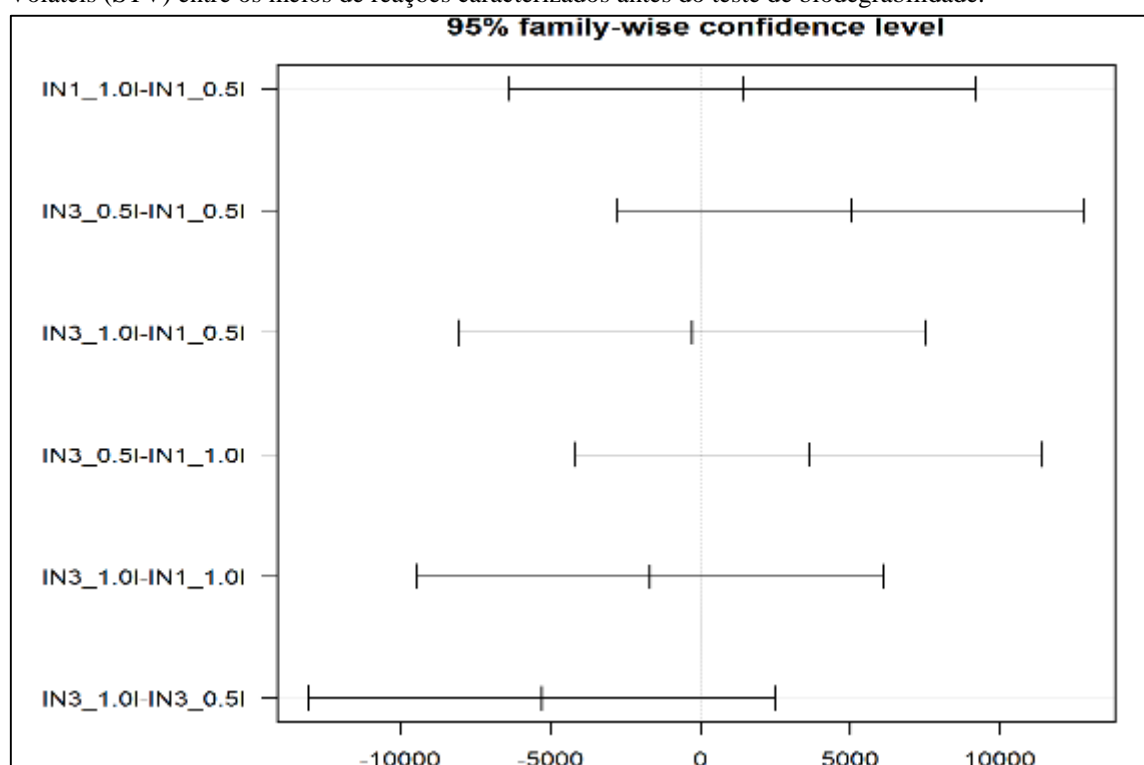
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-5.300	-13.093,907	2.493,907	0,1541799
-------------------	--------	-------------	-----------	-----------

Fonte: AUTORA, 2015.

STV: Sólidos Totais Voláteis; IN1\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1\_1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3\_1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

Na Tabela o primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após \_ indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I indica se a caracterização foi realizada antes do teste de biodegradabilidade.

FIGURA 22- Resultado do teste de Tukey para comparação das médias para o parâmetro e Sólidos Totais Voláteis (STV) entre os meios de reações caracterizados antes do teste de biodegradabilidade.



Fonte: AUTORA, 2015.

IN1\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1\_1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3\_1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

Na Tabela o primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após \_ indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I indica se a caracterização foi realizada antes do teste de biodegradabilidade.

Já utilizando o ANOVA para comparar as médias dos parâmetros estudados a partir da caracterização dos meios de reações após o teste de biodegradabilidade, conclui-se que para todos os parâmetros é possível rejeitar a hipótese de igualdade entre as médias, considerando o nível de significância igual a 5%, conforme se observa na Tabela 29.

TABELA 29- Resultado da análise de variância ANOVA para os parâmetros físico-químicos realizados na caracterização dos meios de reações após o teste de biodegradabilidade, utilizando o programa R, com 3 graus de liberdade para os parâmetros e 8 para os resíduos.

Tabela da ANOVA	Soma quadrado	Quadrado médio	Estatística F	p-valor
pH	0,2014	0,06712	1,113E+29	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
AlcT	2557042	852347	1,085E+31	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
AGV	1586469	528823	1,966E+31	2,00E-16
Resíduo	0,0000	0,0000		
ST	242959400	80986467	395,6	2,11E-05
Resíduo	818800	204700		
STV	26064600	8688200	31,01	0,0031
Resíduo	1120800	280200		
PT	21615	7205	1079	2,86E-06
Resíduo	27	7		
DQO	79068533	26356178	68,36	0,000682
Resíduo	1542222	385556		

Fonte: AUTORA, 2015.

ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio.

#### 5.4.5. Análise por Componentes Principais (PCA).

Ressaltam-se, a partir dos critérios de seleção dos componentes principais, os valores em negritos na Tabela 30, os quais são mais relevantes. Sendo que o primeiro componente principal (PC1) explica 34,29% dos resultados e o segundo componente (PC2) explica 25,64%.

TABELA 30- Resumo da análise de componentes principais para os meios de reações analisados antes e após o teste de biodegradabilidade.

PC	Autovalor	Porcentagem de variância	Percentual acumulado de variância
PC1	<b>4,11</b>	34,29	<b>34,29</b>
PC2	<b>3,08</b>	25,64	<b>59,92</b>
PC3	<b>2,25</b>	18,75	<b>78,67</b>

PC4	<b>1,29</b>	10,75	<b>89,42</b>
PC5	0,56	4,65	94,07
PC6	0,44	3,68	97,74
PC7	0,20	1,71	99,46
PC8	0,05	0,45	99,91
PC9	0,007	0,06	99,97
PC10	0,003	0,02	99,99
PC11	0,0005	0,004	99,99
PC12	0,00001	0,0001	100

Fonte: AUTORA, 2015.

PC: Componente Principal.

Ao atribuir valores (*scores*) para cada meio de reação estudado, detectou-se no primeiro componente principal (PC1) maiores diferenças para o meio de reação formado a partir do Inóculo 1 com relação A/M de 1,0 caracterizado após o teste de biodegradabilidade e o meio de reação formado a partir do Inóculo 3 com relação A/M de 0,5 caracterizado antes do teste. Já para o segundo componente principal (PC2) as maiores diferenças são o meio de reação formado a partir do Inóculo 3 com relação A/M de 0,5 caracterizado após o teste de biodegradabilidade e o meio de reação do mesmo inóculo com A/M de 1,0 caracterizado antes do teste, conforme grifado na Tabela 31.

TABELA 31- Análise dos componentes principais para cada meio de reação analisado antes e após o teste de biodegradabilidade.

Tratamento	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
IN1AM0.5IR1	0,60	9,45	31,11	11,33	4,90
IN1AM0.5IR2	1,23	7,12	32,60	0,21	14,51
IN1AM0.5FR1	1,95	1,49	0,004	0,005	5,81
IN1AM0.5FR2	1,82	2,27	0,02	0,40	3,32
IN1AM1.0IR1	3,42	0,002	0,61	1,83	0,04
IN1AM1.0IR2	0,00	0,05	1,01	6,71	20,10
IN1AM1.0FR1	<b>10,42</b>	2,38	1,33	16,31	1,02
IN1AM1.0FR2	<b>8,72</b>	2,83	1,16	17,93	0,21
IN3AM0.5IR1	<b>31,20</b>	1,68	0,02	3,08	7,16
IN3AM0.5IR2	<b>32,55</b>	1,49	0,00	1,04	6,61
IN3AM0.5FR1	1,32	<b>9,83</b>	6,11	0,51	3,43
IN3AM0.5FR2	1,28	<b>9,21</b>	6,64	0,18	3,44
IN3AM1.0IR1	1,10	<b>16,69</b>	0,07	36,44	0,34
IN3AM1.0IR2	0,57	<b>20,90</b>	0,31	3,64	24,52
IN3AM1.0FR1	2,24	7,30	9,90	0,27	2,78
IN3AM1.0FR2	1,93	7,30	9,09	0,11	1,80

Fonte: AUTORA, 2015.

IN1AM0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1AM1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3AM0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3AM1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

Na Tabela o primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após AM indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I ou F indicam se a caracterização foi realizada antes ou depois do teste de biodegradabilidade e o terceiro número após IR ou FR indica a sequência do resultado, realizado em duplicata.

No caso das variáveis analisadas, no primeiro componente principal (PC1) o ST, STV e AlcT são as variáveis mais relevantes na formação dos grupos e no segundo componente principal (PC2) as variáveis mais relevantes são AlcT e AGV, como pode ser observado na Tabela 32.

TABELA 32- Análise dos componentes principais para cada variável analisada para amostras de inóculos.

Variáveis	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
pH	0,01	0,11	0,97	0,08	0,006
ST	<b>0,95</b>	-0,1017	-0,0325	0,11764	-0,18
STV	<b>0,88</b>	0,03	0,08	-0,17	-0,30
AlcT.	<b>0,76</b>	<b>0,58</b>	-0,05	0,12	0,23
AGV	0,61	<b>0,73</b>	0,04	0,22	0,16
NTK	-0,14	-0,62	0,74	0,04	0,0006
PT	0,58	-0,73	-0,30	-0,01	0,16
DQO	0,51	-0,50	0,56	0,28	-0,14
STV/ST	-0,45	0,39	0,22	-0,70	-0,03
AGV/AlcT.	0,04	0,83	0,49	0,15	0,05
DQO:N:P	-0,58	-0,12	0,12	0,59	0,28
P	0,58	-0,37	0,19	-0,49	0,49

Fonte: AUTORA, 2015.

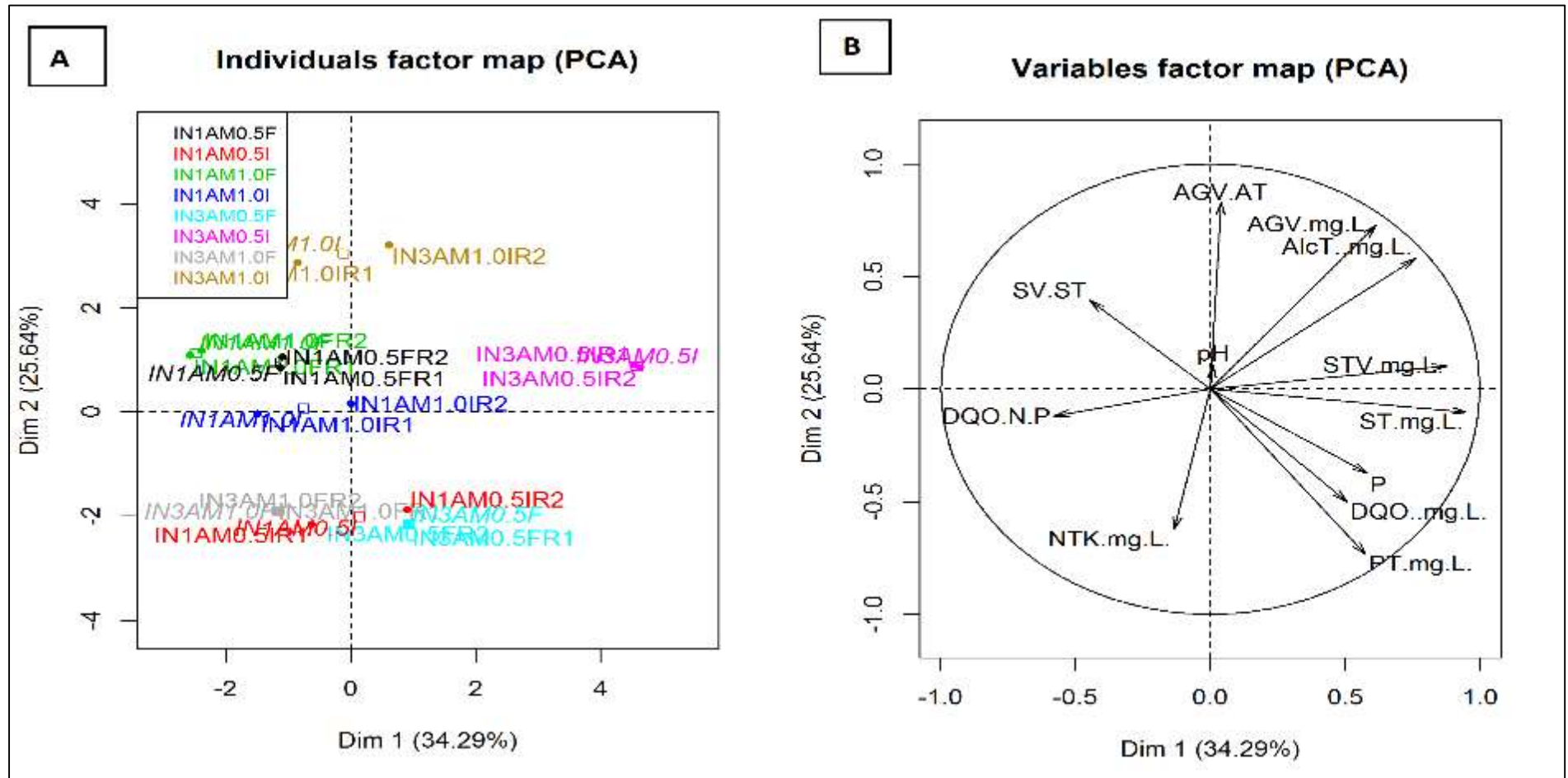
ST: Sólidos Totais; STV: Sólidos Totais Voláteis; AlcT: Alcalinidade Total; AGV: Ácidos Graxos Voláteis; NTK: Nitrogênio Total Kjeldahl; P: Fósforo; PT: Fósforo Total; DQO: Demanda Química de Oxigênio; PC: Componente Principal.

Nas figuras abaixo, pode-se observar melhor a formação dos grupos. No diagrama de *scores* (Figura 23A) observa a existência de oito grupos distintos. Nos quais os meios de reação formado a partir do Inóculo 1 para ambas relações A/M caracterizados após o teste de biodegradabilidade e os meios de reação formado a partir do Inóculo 3 para ambas relações A/M caracterizados antes o teste de biodegradabilidade estão localizados no quadrante superior. No quadrante inferior estão localizados o meio de reação formado a partir do Inóculo 1 para relação A/M de 0,5 caracterizado antes do teste de biodegradabilidade e os meios de reações formado a partir do Inóculo 3 para

ambas relações A/M caracterizados após o teste. Já o meio de reação formado a partir do Inóculo 1 para relação A/M de 1,0 caracterizado antes do teste de biodegradabilidade está localizado no centro do diagrama.

As variáveis que são responsáveis pela formação dos grupos podem ser visualizadas no diagrama de *loadings* (Figura 23B). Ao correlacionar ambos os diagramas se observa que as variáveis pH, AlcT, AGV e frações de sólidos são responsáveis principalmente pela formação dos grupos localizados no quadrante superior. A formação dos grupos localizados no quadrante inferior do diagrama observa uma maior concentração de nutrientes (NTK, PT e DQO).

FIGURA 23- Análise de Componente Principal dos atributos físico-químicos: diagrama de ordenação das amostras (*scores*) e formação de grupos de amostras semelhantes (a) e diagrama de ordenamento das variáveis (*loadings*) (b) levando-se em consideração os componentes



Fonte: AUTORA, 2015.

Na Figura (a) o primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após AM indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I ou F indicam se a caracterização foi realizada antes ou depois do teste de biodegradabilidade e o terceiro número após IR ou FR indica a sequencia do resultado, realizado em duplicata. IN1AM0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1AM1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3AM0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3AM1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

#### 5.4.6. Atividade metanogênica e produção de biogás a partir dos meios de reações:

A partir do monitoramento do biogás produzido no experimento para cada tipo de inóculo e relações alimento/microrganismos diferente, o inóculo 3 para ambas relações A/M obteve melhor desempenho no teste. Ao estudar os resultados, pode-se apontar um desempenho um pouco melhor para relação A/M de 0,5, conforme observado na Tabela 33.

TABELA 33 - Resultados do teste de biodegradabilidade para os meios de reações preparados na pesquisa.

Amostra	VCH <sub>4</sub> máximo (mL)	AME máximo (gDQO/gSV·d)	Biogás - % CH <sub>4</sub>
Inóculo 1 A/M = 0,5	3,16	0,11	13,3
Inóculo 1 A/M = 1,0	2,97	0,14	12,3
Inóculo 3 A/M = 0,5	29,31	0,47	58,5
Inóculo 3 A/M = 1,0	23,35	0,44	46,2

Fonte: AUTORA, 2015.

VCH<sub>4</sub>: Volume de metano; DQO: Demanda Química de Oxigênio; SV: Sólidos Voláteis; AME: Atividade Metanogênica Específica

Inóculo 1: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé; Inóculo 3: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria; A/M: Alimento/Microrganismos

O inóculo 3, quanto a produção de biogás e composição de metano, obteve um desempenho conforme se aponta na literatura. Segundo Chynoweth *et al* (1996) *apud* Barcelos (2009), “uma produção típica de biogás gerado da FORSU é de 0,4 m<sup>3</sup>/Kg de SV adicionado, e a sua composição é de 55% de metano e 45% de CO<sub>2</sub> (CNTP)”.

Devido a inúmeras variáveis que podem se diferenciar em cada pesquisa, como volume do reator, tempo de detenção, tipo substrato e inóculo, e relação A/M, há uma dificuldade de comparações dos resultados obtidos com os encontrados na literatura. Para experimentos tendo como substrato o FORSU, os autores Carneiro (2005), Picanço (2004) e Felizola (2006), respectivamente, obtiveram para o metano uma produção máxima de 64%, 70% e 22%.

Acredita-se que a baixa produção de metano para o inóculo 1, ocorreu devido ao acúmulo de AGV, o qual podemos observar no tópico anterior na caracterização dos meios de reações.

#### 5.4.7. Aplicando regressão não-linear – Função Sigmoidal.

Também foi utilizado a regressão não-linear na avaliação da produção de biogás durante o teste de biodegradabilidade os meios de reações estudados, assim ajustando os dados de produção de metano acumulado aos modelos de funções sigmoidais escolhidas.

Ao sintetizar a produção de metano acumulado para o Inóculo 1 com relação A/M de 0,5, conforme Tabela 34, chegando ao período de 3,79 dias com produção máxima de 3,16 mL. Aplicando a regressão não-linear para estes dados, pode-se observar o comportamento de cada função sigmoidal na Figura 24, e utilizando como critério de seleção para o melhor ajuste o erro padrão residual, segundo Tabela 35, opta-se pelo modelo de Morgan-Mercer-Flodin (MMF).

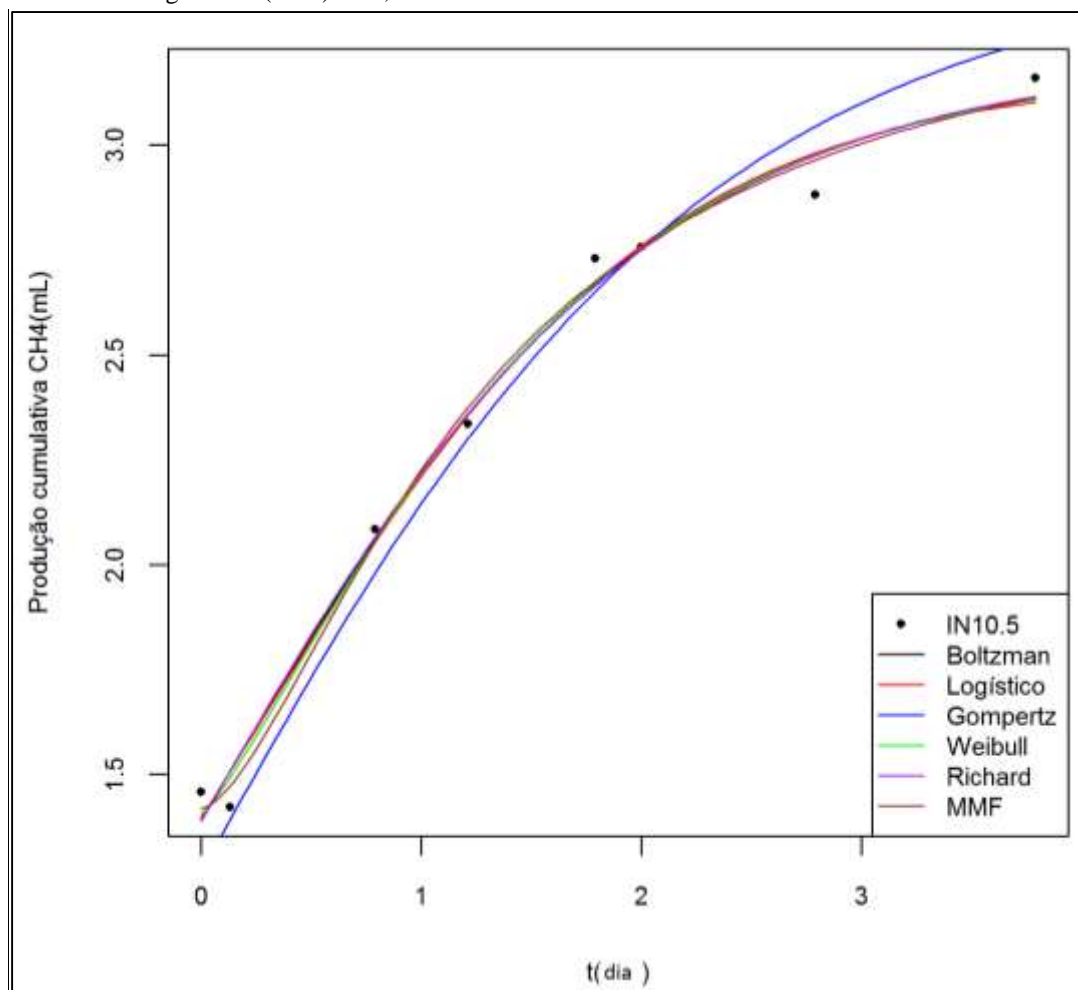
TABELA 34- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 0,5 durante o teste de biodegradabilidade.

Tempo (dias)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	1,22
0,13	1,42
0,21	1,46
0,25	2,04
0,79	2,08
1,21	2,34
1,79	2,73
2,00	2,76
2,79	2,88
3,79	3,16

Fonte: AUTORA, 2015.



FIGURA 24- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5.



Fonte: AUTORA, 2015.

TABELA 35- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5.

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 3,1929$	3,0850	0,08399
	$\beta = 0,0001$	0,1685	
	$\gamma = 1,0124$	1,5500	
	$\delta = -3,6014$	0,5180	
Weibull	$\alpha = 3,18786$	0,15502	0,07777
	$\beta = 1,40578$	0,06615	
	$\gamma = 0,60622$	0,08767	
	$\delta = 1,22649$	0,24417	
Richards	$\alpha = 3,2159$	0,2006	0,08345
	$\beta = 0,3350$	2,4625	
	$\gamma = 0,9002$	0,5725	
	$\delta = 0,3443$	2,2279	

<b>MMF</b>	$\alpha = 3,42481$	0,25705	<b>0,06781</b>
	$\beta = 1,41833$	0,05602	
	$\gamma = 1,48604$	0,32333	
	$\delta = 1,56769$	0,37431	
Gompertz	$\alpha = 3,44938$	0,22841	0,134
	$\beta = 1,00000$	0,08228	
	$\gamma = 0,74507$	0,15413	
Logístico	$\alpha = 3,16996$	0,08725	0,07552
	$\beta = 1,26888$	0,09156	
	$\gamma = 1,07253$	0,11518	

Fonte: AUTORA, 2015.

Por meio do cálculo do ponto de inflexão e a máxima taxa de variação de produção de metano, para o modelo de MMF, segundo Tabela 36, ao avaliar estes resultados para o Inóculo 1 com relação A/M de 0,5, foi identificado que no decorrer de 0,49 dias com uma produção cumulativa de metano de 2,16 mL houve uma máxima taxa de variação de 0,95 mL/dia. Identificando que esse momento, na qual a derivada da função sigmoidal passa a ter concavidade para baixo, é o ideal para realizar uma alimentação do reator, a suprir a necessidade dos microrganismos e impulsionar a produção de metano.

A estimativa dos parâmetros de ajustes para o modelo de Richards, para avaliação dos resultados da produção de metano para o Inóculo 1 com relação A/M de 0,5, não satisfaz as condições de restrição dos parâmetros, onde  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 1$ ,  $\gamma > 0$  e  $\delta > 0$ , sendo  $\beta = 0,3350$ . Portanto, impossibilitando para este modelo chegarmos ao ponto de inflexão e máxima taxa de variação da produção de metano.

TABELA 36- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5.

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	t	Y	
Boltzman	0,00	1,39	1,78
Weibull	0,38	1,69	0,88
Richards	-	-	-
<b>MMF</b>	0,49	2,16	<b>0,95</b>
Gompertz	0,00	1,27	0,95
Logístico	0,22	1,58	1,70

Fonte: AUTORA, 2015.

A produção de metano para o inóculo 1 com relação A/M de 1,0, alcançou uma produção máxima no período de 7,93 dias com um volume de 2,97 mL, conforme Tabela 37. Aplicando a regressão não-linear para estes dados, conforme Figura 25, e de acordo com o critério de seleção, segundo Tabela 38, tem-se como melhor ajuste o modelo de MMF.

TABELA 37- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/ Microrganismo (A/M) de 1,0 durante o teste de biodegradabilidade.

Tempo (dias)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	0,71
0,13	0,98
0,22	1,18
0,81	1,76
0,92	1,79
1,21	1,83
1,81	2,15
2,00	2,19
2,81	2,33
3,81	2,35
6,92	2,86
7,93	2,97

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 25- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) com relação Alimento/Microorganismo (A/M) de 1,0.

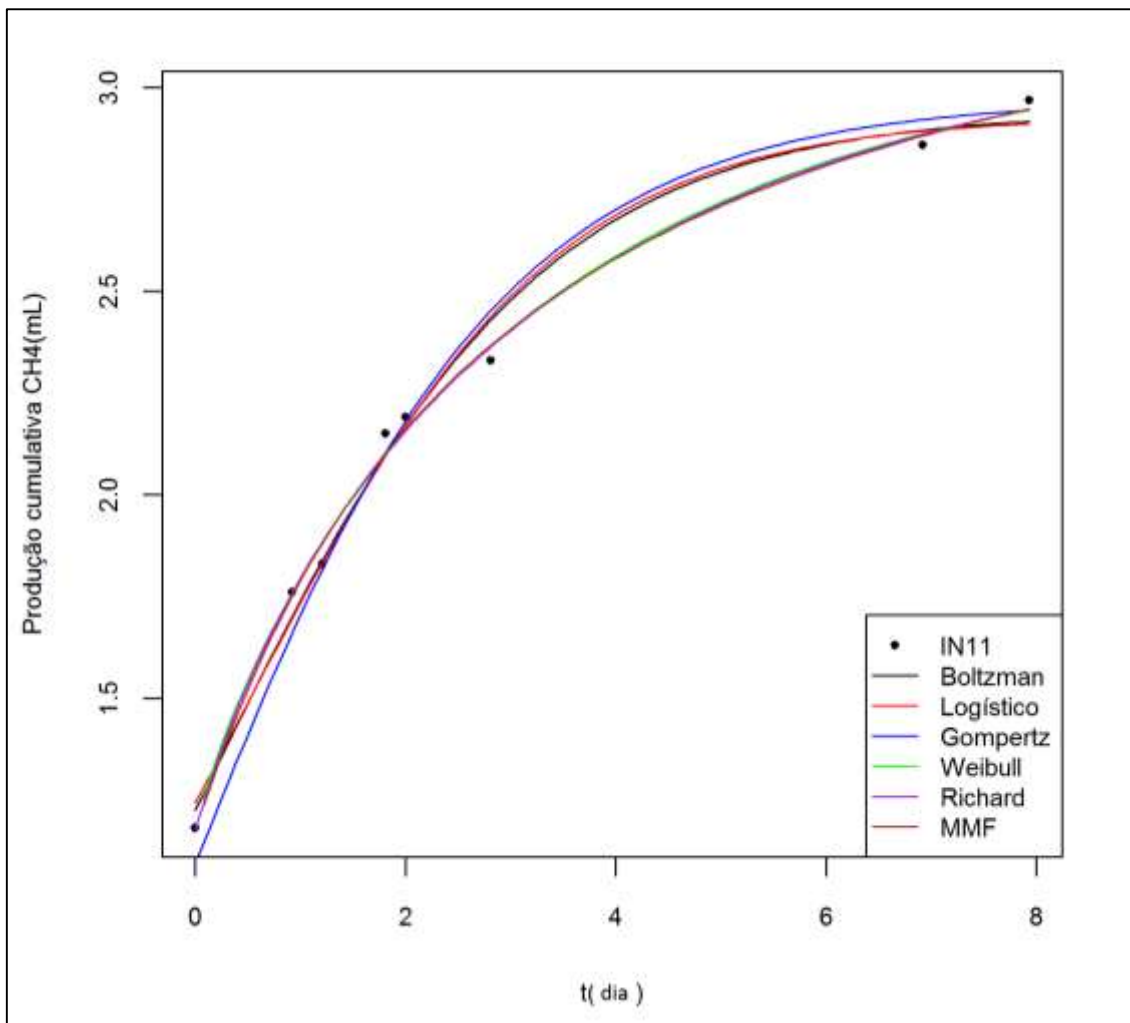


TABELA 38- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0.

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 2,94253$	0,07992	0,07518
	$\beta = 0,00010$	2,16030	
	$\gamma = 1,61612$	0,67667	
	$\delta = -3,43778$	2,46720	
Weibull	$\alpha = 3,14412$	0,18874	0,04806
	$\beta = 1,17692$	0,04798	
	$\gamma = 0,37641$	0,03793	
	$\delta = 0,87230$	0,13279	
Richards	$\alpha = 3,1676$	0,2220	0,04728
	$\beta = -0,8698$	0,1531	
	$\gamma = 0,2321$	0,1371	
	$\delta = -2,0587$	1,0271	
<b>MMF</b>	$\alpha = 3,55748$	0,33377	<b>0,04531</b>
	$\beta = 1,17842$	0,04527	
	$\gamma = 2,90039$	0,45451	
	$\delta = 1,02880$	0,18631	
Gompertz	$\alpha = 2,97268$	0,07381	0,08878
	$\beta = 1,0000$	0,07067	
	$\gamma = 0,58613$	0,06675	
Logístico	$\alpha = 2,92984$	0,05910	0,07412
	$\beta = 1,35792$	0,11795	
	$\gamma = 0,67726$	0,06896	

Fonte: AUTORA, 2015.

Identifica-se por meio do ponto de inflexão da curva para o modelo de MMF de (0,05; 0,07), avaliando os resultados para o Inóculo 1 com relação A/M de 1,0, segundo Tabela 39, que no decorrer de 0,05 dias com uma produção cumulativa de metano de 0,07 mL houve uma máxima taxa de variação de 0,075 mL/dia. Portanto, neste ponto (0,05; 0,07) a derivada da função sigmoideal passa a ter concavidade para baixo, sendo o ideal para realizar uma alimentação do reator.

A estimativa dos parâmetros de ajustes para os modelos de Weibull e Richards, na avaliação dos resultados para o Inóculo 1 com relação A/M de 1,0, também não satisfazem as condições de restrições das funções. No modelo de Weibull tem-se que  $0 < \beta < \alpha$ ,  $\gamma > 0$  e  $\delta > 1$ , sendo que  $\delta = 0,87230$ , não sendo possível obter os pontos de inflexão e máxima taxa de variação da produção de metano. No modelo de Richard,

onde  $\beta = -0,8698$  e  $\delta = -2,0587$ , já que se tem como restrições dos parâmetros  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 1$ ,  $\gamma > 0$  e  $\delta > 0$ , não é possível obter o ponto de inflexão e a máxima taxa de variação.

TABELA 39- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 1 (Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0.

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	t	Y	
Boltzman	0,00	1,22	1,06
Weibull	-	-	-
Richards	-	-	-
<b>MMF</b>	0,05	0,07	<b>0,75</b>
Gompertz	0,00	1,09	0,64
Logístico	0,00	1,09	0,64

Fonte: AUTORA, 2015.

O inóculo 3 para relação A/M de 0,5, apresentou uma maior produção de metano em período mais curto ao comparar com os outros meios de reações estudados, com um volume máximo de metano de 29,31 mL no período de 3,81 dias, conforme visualiza-se na Tabela 40. Aplicando a regressão não-linear para estes dados, segundo Figura 26 e Tabela 41, tem-se como melhor ajuste para este caso o modelo de Richards por apresentar um menor erro padrão residual.

TABELA 40- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5 durante o teste de biodegradabilidade.

Tempo (dias)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	5,20
0,13	5,94
0,22	8,83
0,81	17,49
0,92	18,62
1,21	20,79
1,81	25,17
2,00	26,24
2,81	28,55
3,81	29,31

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 26- Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) com relação Alimento/Microorganismo (A/M) de 0,5.

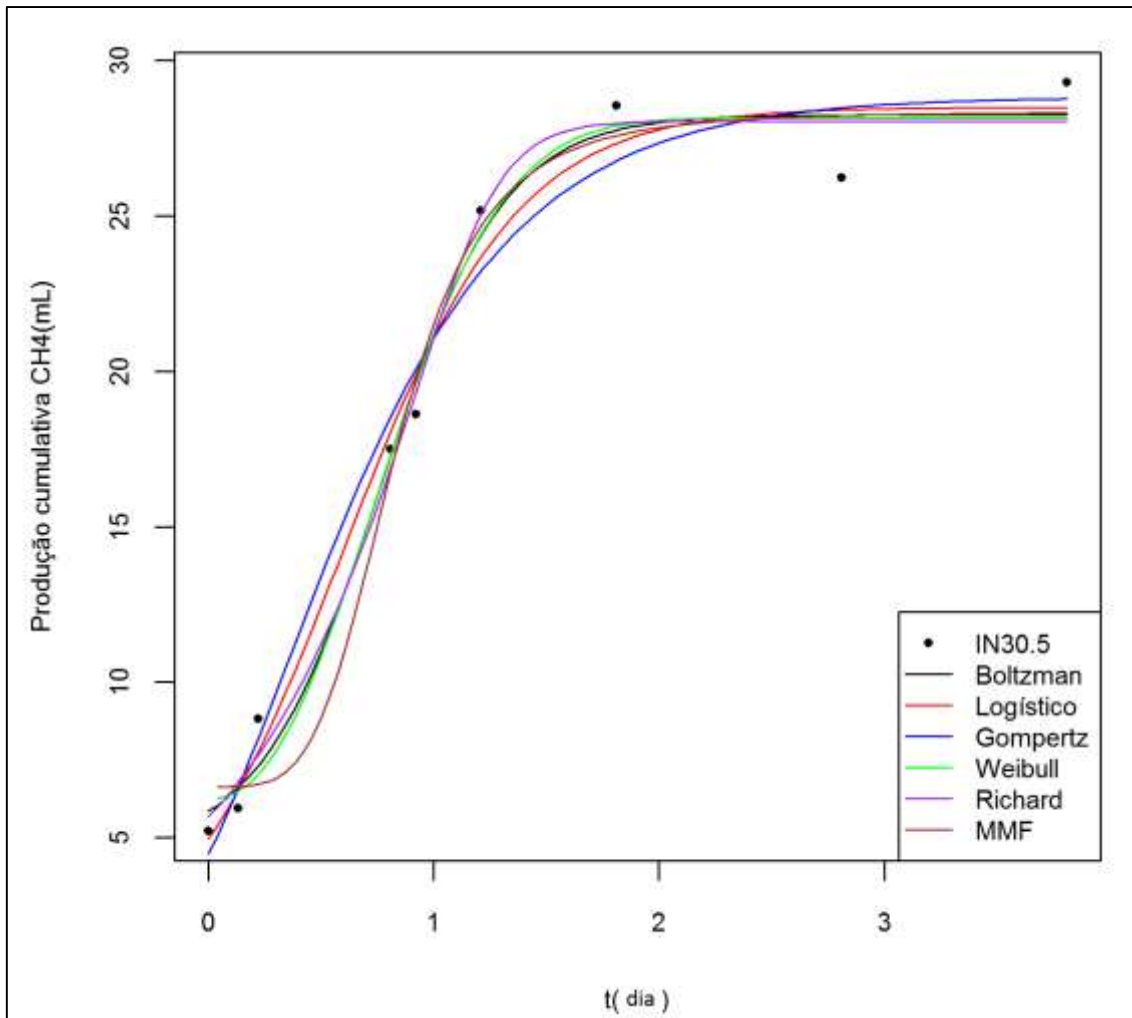


TABELA 41- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5.

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 28,25727$	0,91978	1,456
	$\beta = 0,76742$	0,10253	
	$\gamma = 0,27097$	0,09639	
	$\delta = -23,73166$	3,00625	
Weibull	$\alpha = 28,1644$	0,9562	1,53
	$\beta = 6,2411$	1,0246	
	$\gamma = 1,1419$	0,182	
	$\delta = 2,2838$	0,7359	
Richards	$\alpha = 2,806E+01$	7,673E-01	<b>1,288</b>
	$\beta = 2,545E+03$	1,497E+04	
	$\gamma = 6,727E+00$	4,477E+00	
	$\delta = 4,898E+00$	3,858E+00	
MMF	$\alpha = 28,3495$	1,2067	1,724
	$\beta = 6,6366$	1,0050	
	$\gamma = 0,4603$	0,1674	
	$\delta = 4,2727$	1,7356	
Gompertz	$\alpha = 28,8343$	1,1866	1,673
	$\beta = 1,8645$	0,2173	
	$\gamma = 1,7806$	0,2529	
Logístico	$\alpha = 28,5039$	0,9253	1,446
	$\beta = 4,7512$	0,9110	
	$\gamma = 2,6028$	0,2991	

Fonte: AUTORA, 2015.

Com o ponto de inflexão (0,93; 19,53), conforme Tabela 42, para o modelo Richard com menor erro padrão residual, ao avaliar os resultados do Inóculo 3 para relação A/M de 0,5, teve-se no decorrer de 0,93 dias uma produção cumulativa de metano de 19,53 mL, havendo uma máxima taxa de variação de 88,01 mL/dia, sendo o momento ideal para suprir a necessidade dos microrganismos e impulsionar a produção de metano.



TABELA 42- Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Especifica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 0,5.

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	T	y	
Boltzman	0,77	16,39	43,79
Weibull	0,73	10,95	21,88
<b>Richards</b>	<b>0,93</b>	<b>19,53</b>	<b>22,28</b>
MMF	0,75	244,61	29,39
Gompertz	0,35	10,61	18,89
Logístico	0,60	14,25	37,09

Fonte: AUTORA, 2015.

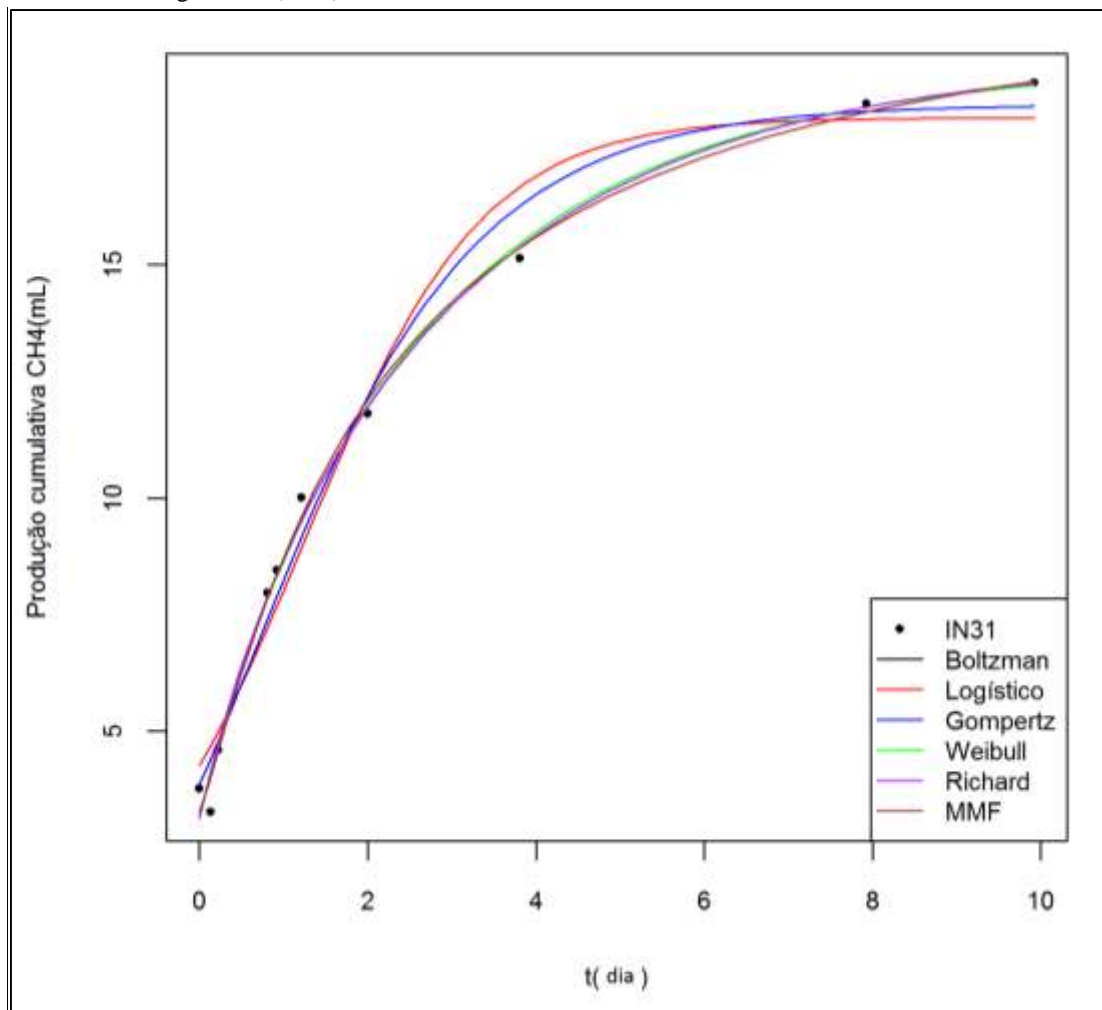
A produção de metano para o inóculo 3 com relação A/M de 1,0, chegou ao máximo no período de 8,90 dias com um volume de 23,35 mL, conforme Tabela 43. Aplicando a regressão não-linear para estes dados, conforme Figura 27, e ainda de acordo com o critério de seleção, segundo Tabela 44, tem-se mais uma vez como melhor ajuste o modelo de MMF.

TABELA 43- Produção cumulativa de metano (mL) na avaliação de atividade metanogênica específica do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0 durante o teste de biodegradabilidade.

Tempo (dias)	Volume de Metano (CH <sub>4</sub> ) Acumulado (mL)
0,00	3,26
0,13	3,76
0,22	3,89
0,81	4,59
0,92	7,96
1,21	8,41
1,81	8,45
2,00	10,01
2,81	11,80
3,81	15,14
6,92	17,01
7,93	18,46
8,90	23,35

Fonte: AUTORA, 2015.

FIGURA 27- - Ajustes dos modelos aplicados aos dados de produção de metano durante o teste de biodegradabilidade para o Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) com relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0.



Fonte: AUTORA, 2015.

TABELA 44- Modelos de regressão não-linear, estimativas dos parâmetros de ajuste e seu erro padrão o, e erro padrão residual, relativo a produção de metano durante o teste de biodegradabilidade, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0.

Modelo	Estimativa dos parâmetros	Erro padrão	Erro padrão residual
Boltzman	$\alpha = 18,5380$	0,6377	0,7769
	$\beta = 0,0001$	1,8604	
	$\gamma = 1,5512$	0,5763	
	$\delta = -29,7694$	19,0257	
Weibull	$\alpha = 19,37193$	0,78835	0,5208
	$\beta = 3,14467$	0,43905	
	$\gamma = 0,41543$	0,04038	
	$\delta = 0,92088$	0,11139	
Richards	$\alpha = 19,47014$	0,77408	0,5009
	$\beta = -0,92110$	0,06986	
	$\gamma = 0,31346$	0,09529	
	$\delta = -1,38876$	0,40083	
MMF	$\alpha = 21,7073$	1,3874	0,4421
	$\beta = 3,2696$	0,3702	
	$\gamma = 2,3781$	0,2687	
	$\delta = 1,1311$	0,1527	
Gompertz	$\alpha = 18,43670$	0,57069	0,793
	$\beta = 1,56197$	0,10880	
	$\gamma = 0,66252$	0,08028	
Logístico	$\alpha = 18,1561$	0,7166	1,064
	$\beta = 3,2522$	0,5251	
	$\gamma = 0,9449$	0,1527	

Fonte: AUTORA, 2015.

Conforme Tabela 45, para o modelo MMF com menor erro padrão residual, ao avaliar os resultados do Inóculo 3 para relação A/M de 1,0, obteve-se no decorrer de 0,18 dias uma produção cumulativa de metano de 1,85 mL, havendo uma máxima taxa de variação de 6,23 mL/dia, sendo o momento ideal para suprir a necessidade dos microrganismos e impulsionar a produção de metano.

A estimativa dos parâmetros de ajustes para os modelos de Weibull e Richards, na avaliação dos resultados para o Inóculo 3 com relação A/M de 1,0, também não satisfazem as condições de restrições das funções. No modelo de Weibull tem-se que  $0 < \beta < \alpha$ ,  $\gamma > 0$  e  $\delta > 1$ , sendo que  $\gamma = 0,41543$  e  $\delta = 0,92088$ , não sendo possível obter os pontos de inflexão e máxima taxa de variação da produção de metano. No modelo de Richard, onde  $\beta = -0,92110$ , e  $\delta = -1,38876$ , já que se tem como restrições dos

parâmetros  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 1$ ,  $\gamma > 0$  e  $\delta > 0$ , não é possível obter o ponto de inflexão e a máxima taxa de variação.

TABELA 45-Ponto de Inflexão e Taxa máxima de variação da produção de metano, calculados para os modelos de regressão não-linear utilizados, relativo a produção de metano durante o teste de Atividade Metanogênica Específica, a partir do Inóculo 3 (Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria) para relação Alimento/Microrganismo (A/M) de 1,0.

Modelo	Ponto de Inflexão		Taxa máxima de variação
	T	Y	
Boltzman	0,00	3,65	9,60
Weibull	-	-	-
Richards	-	-	-
<b>MMF</b>	0,18	1,85	<b>6,23</b>
Gompertz	0,67	6,78	4,49
Logístico	1,25	9,08	8,58

Fonte: AUTORA, 2015.

## 6. CONCLUSÕES

Com auxílio da ferramenta estatística, por meio principalmente da análise das componentes principais, pode-se concluir na etapa de caracterização dos inóculos, que os lodos oriundos de um reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1) e o lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) possuem características mais favoráveis ao processo de digestão anaeróbia, tais como elevados índices de alcalinidade, nutrientes e sólidos totais voláteis.

Ao avaliar a atividade metanogênica dos quatros inóculos testados, o inóculo oriundo de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3), apresentou um maior desempenho com uma AME máximo de 0,80 gDQO/gSV·d, volume máximo de metano de 21,98 mL e 67,5% de metano presente no biogás, ainda em um período mais curto de 0,83 dia ao comparar com as outras amostras

Também foi possível concluir na etapa de caracterização dos meios de reações, que o meio mais propicio para o desenvolvimento dos microrganismos metanogênicos foi o meio de reação formado a partir do lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) para relação alimento/microrganismos de 0,5. O inóculo 3 apresentou alto teor de alcalinidade, 6124,4 mg CaCO<sub>3</sub>/L, boa relação AGV/AlcT de 0,53 e uma relação DQO:N:P de 350:23:1.0, o mais próximo do indicado na literatura ao comparar as outras amostras.

Ao avaliar a atividade metanogênica e a produção de biogás no teste de biodegradabilidade, o inóculo 3 com uma relação A/M de 0,5 apresentou um melhor desempenho, com um volume máximo de metano de 29,31 mL, uma AME máxima de 0,47 gDQO/gSV·d e 58,5% de metano presente no biogás, em um período curto de 3,81 dias.

Por meio desta pesquisa, concluiu-se que um inóculo com características semelhantes ao inóculo 3, devem ser mais indicados para a digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domiciliares.

Observou-se a importância do monitoramento frequente dos parâmetros físicos e químicos, no decorrer do processo de digestão anaeróbia do FORSD, para suprir as necessidades dos microrganismos e obter um melhor desempenho na remoção de matéria orgânica e produção de metano.

## 7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se utilizar tantas quanto forem necessárias as ferramentas estáticas antes e durante cada etapa do trabalho, avaliando os resultados em conjunto ao prosseguir para próxima etapa.

Recomenda-se, devido à heterogeneidade das amostras na etapa de caracterização, aumentar o número de replicatas e para os testes de AME e biodegradabilidade se faz necessário repetições.

Recomenda-se uma menor utilização de fração orgânica padrão nas pesquisas para conferir características mais semelhantes ao encontrado nas comunidades. Também recomenda-se uma investigação maior das características físicas e químicas das frações orgânicas e meios de reações utilizados nos testes.

Recomenda-se um maior estudo para avaliar a relação ótima de alimento/microrganismos.

Recomenda-se métodos mais eficientes de vedação e medição de biogás ao utilizar frascos de vidro durante os testes.

Recomenda-se utilizar reatores pilotos de maior escala para avaliar diferentes inóculos na digestão anaeróbio do FORSD.

Recomenda-se investigar consórcios de microrganismos para acelerar o método de digestão anaeróbio do FORSD.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **BR 10004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004a.
- ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil, 2012.** São Paulo, 2012.
- ALVES, M. M. S. **Estudo e caracterização de Digestores anaeróbios de leito fixo.** Tese (Doutorado em Engenharia Biológica Química) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Lisboa, 1998.
- ANDREOLI, C. V. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG; Companhia de Saneamento do Paraná, 2001. 484p 6 vol.
- ANGELIDAKI, I. ALVES, D.; BOZONELLA, L.; BORZACONNI, L.; CAMPOS, L. GUWI, A.; KALYUZHNYL, S.; JENICEK, P.; VAN LIER, J. **Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays.** Water science and technology. Vol 59, 2009.
- ANJOS, A. dos. **Análise de Variância.** Notas de Aula, Capítulo 7, Disciplina: ce003, Curitiba, 2009. Disponível em: <http://www.est.ufpr.br/ce003/material/apostilace003.pdf> Acesso em: 19 de novembro de 2014.
- APHA. **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater.** 20ª edição. American Water Work Association, Water Environment federation. Washington: 2005. 953p.
- BARCELOS, B. R. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2009. 90 p.
- BARREIRA, C. *et. al.* **Mapa da Criminalidade e da Violência em Fortaleza. Perfil da SER III.** Cartilha III Publicação: Laboratório de Direitos Humanos, Cidadania e Ética da Universidade Estadual do Ceará-LabVida-UECE; Laboratório de Estudos da Conflitualidade da Universidade Estadual do Ceará-COVIO-UECE; Laboratório de Estudos da Violência da Universidade Federal do Ceará-LEV-UFC. Fortaleza, 2011.
- BRAUNA, C. H. da C. **Co-digestão anaeróbia de tortas de oleaginosas visando à produção de metano.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Publicada no D.O.U., Seção 1, de 3 de agosto de 2010.

CARNEIRO, P. M. **Remoção de BTEX em biorreatores anaeróbios sob condições Metanogênicas, desnitrificantes e sulfetogênicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza, 2012.

CARNEIRO, D. R. C. **Viabilidade Técnica e Económica de uma Unidade Centralizada de Co-digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2009.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997. 2. ed. Belo horizonte, 2007.

DESIGNTOTAL. Disponível em:

<http://filipecaricaturas.blogspot.com.br/2009/02/processo-reciclagem.html> Acesso em: 29 de junho de 2014

DOS SANTOS, A. B. **Aplicação conjunta de tratamento anaeróbio termofílico por lodo granular e de mediadores redox na remoção de cor de águas residuárias têxteis.** Rev. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, p. 253-259, 2005.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: uma abordagem tecnológica.** Dissertação (Mestrado em Ciências em planejamento energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. 189 p.

HOORNWEG, DANIEL; BHADA-TATA, PERINAZ. 2012. **What a waste : a global review of solid waste management.** Urban development series ; knowledge papers no. 15. Washington, DC: World Bank.

HABITZREUTER, M. T. **Análise da Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) da Região de Santa Maria Pré e Pós Triagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

IBGE. **Censo Demográfico 2010.** Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, dados referentes ao município de Fortaleza, fornecidos em meio eletrônico. Disponível em:  
[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados\\_dou/CE2010.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/CE2010.pdf) Acesso em: 26 de junho de 2014.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005. 683 p



JULIATTO, D. L.; CALVO, M. J.; CARDOSO, T. E. **Gestão Integrada de Resíduos Sólidos para Instituições Públicas de Ensino Superior**. Rev. Gestão Universitária da América Latina - GUAL. Florianópolis, v. 4, n. 3, p.170-193, set/dez. 2011

FERNANDES, C. H. R. **Biodegradabilidade termofílica dos resíduos sólidos urbanos e potencialidade em biogás**. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Universidade de Lisboa. Faculdade de Ciências. Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia. Lisboa, 2013.

FLORENTINO, H. O.; BISCARO, F. V.; PASSOS, J. R. S. **Funções sigmoidais aplicadas na determinação da Atividade Metanogênica Específica – AME**. Rev. Bras. Biom., São Paulo, v.28, n.1, p.141-150, 2010

FRANÇA, M. **Avaliação da biodegradabilidade e da biodisponibilidade do lodo de esgoto anaeróbio termohidrolisado pelo uso de biogás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Florianópolis, 2002.

GONÇALVES, C. do P. **Impacto do lançamento de lodo de tanques sépticos / fossas sépticas em estações de tratamento de esgoto com reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)**. Dissertação (Mestrado na área de concentração de hidráulica e saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

GONÇALVES, C. S. **Avaliação do Potencial de Geração de Biogás a partir de Resíduos de Boviniculturas na Área Metropolitana do Porto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2010.

KLANG, H. **Recursos naturais**. Disponível em:  
[http://www.helenaklang.com/MR\\_expo/Energia.htm](http://www.helenaklang.com/MR_expo/Energia.htm) Acesso em: 29 de junho de 2014.

LEITE, V. D.; *et. al.* **Tratamento anaeróbio de resíduos orgânicos com baixa concentração de sólidos**. Engenharia Sanitária Ambiental. vol. 9 - nº 4 - out/dez 2004.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação da eficiência e da aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002. 156 f.

LIXO QUE VIRA LIXO. **As soluções convencionais**. Disponível em:  
<http://lixoqueviralivro.blogspot.com.br/2008/11/as-solues-convencionais-os-aterros.html> Acesso em: 29 de junho de 2014.

LOUZADA, A. G. **Avaliação da atividade metanogênica específica com condicionamento hidrolítico proveniente do sistema UASB +BFs**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2006.

- LOUZADA, P. T.; PEREZ, A. **Actividad Metanogénica Específica: Una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales.**
- MACHADO, M. F. de S. **A situação brasileira dos bio sólidos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil. Campinas, 2001.
- MACHADO, F. L. de O. **Co-digestão anaeróbia de microalgas e de glicerol residual do biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Fortaleza, 2012.
- MAZUCHELI, J.; ACHCAR, J. A. **Algumas considerações em regressão não linear** Revista *Acta Scientiarum*, Maringá, v. 24, n. 6, p. 1761-1770, 2002
- MENESES, S. L. de. **Cana-de-açúcar e silagem em cana em codigestão com esterco bovino na produção de biogás.** Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade em Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal, 2011.
- MORAES, L. de M. **Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de lodos de esgoto provenientes de reatores anaeróbios.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.
- MOREIRA, M. F. da C. **Viabilidades Técnica e Económica da Digestão Anaeróbia Aplicada ao Tratamento dos Resíduos das Boviniculturas da Área Metropolitana do Porto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente). Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia. Porto, 2011.
- PICANÇO, A. P. **Influência da circulação de percolado em sistema de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade em São Paulo, Escola de Engenharia de São Paulo. São Carlos, 2004.
- PIMENTEL, F. J. G. **Aproveitamento de lodo de estação de tratamento de esgoto em camada de cobertura de aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2012.
- PINTO, R. O. **Avaliação da digestão anaeróbia na bioestabilização de resíduos sólidos orgânicos, lodos de tanques sépticos, dejetos suínos e lixiviado.** Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.
- PIVELI, R. P. **Qualidade e Poluição das Águas: Aspectos Físico-Químicos.** São Paulo/SP: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2000.
- PMF. Prefeitura Municipal de Fortaleza. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos de Fortaleza.** Fortaleza, 2012.

PMF. Prefeitura Municipal de Fortaleza. **Desenvolvimento Humano, por Bairro, em Fortaleza.** Fortaleza, 2014.

PROSAB. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.** Sérgio Túlio Cassini (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. 210 p.

PROSAB. **Lodo de Fossa séptica: Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final.** Coordenador: Cleverson Vitório Andreoli. Rio de Janeiro, ABES, 2009.

PRS. Portal de Resíduos Sólidos. **Tratamento de resíduos de serviços de saúde.** Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/tratamento-de-residuos-de-servicos-de-saude/> Acesso em: 29 de junho de 2014.

REIS, A. dos S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Núcleo de Tecnologia. Recife, 2012.

ROCHA, M. A. G. **Estudos da atividade metanogênica de lodos e da biodegradabilidade anaeróbia de efluentes de indústrias de bebidas.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil (Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Recife, 2003. 130 f.

ROSA, R. S. MESSIAS, R. A. AMBROZINI, B. **Importância da compreensão dos ciclos biogeoquímicos para o desenvolvimento sustentável.** Universidade de São Paulo. Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 2003.

SANTOS, A. F. de M. S. **Tratamento anaeróbio de chorume em conjunto com esgoto sanitário.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, CTG. Recife, 2009.

SANTAELLA, S. T. *et. al.* **Resíduos sólidos e a atual política ambiental brasileira.** Fortaleza: UFC / LABOMAR / NAVE, 2014. 232 p. Coleção Habitat, v. 7

SANTOS, M. T. L. **Contribuição para o estudo da digestão aneróbia de resíduos anaeróbios.** Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária) - Universidade de Nova Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa, 2010.

SCHALCH, V. *et. al.* **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos.** Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Hidráulica e Saneamento. São Carlos, 2002.

SEGATO, L. M. **Caracterização do chorume do aterro sanitário de Bauru.** XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Bauru, 2000.

SENA, H. C. **Recebimento de Lodo de ETA em ETE por lodo Ativado operando com mídia plástica no tanque de aeração (MBBR).** Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2011.

STEIL, L. **Avaliação da Atividade Microbiana Anaeróbia Metanogênica na Lagoa de Estabilização Anaeróbia da Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários do Município de Cajati, Vale do Ribeira de Iguape, Estado de São Paulo.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

UEDA, C. M. **Modelos não lineares com diferentes estruturas de covariância em curvas de crescimento: uma aplicação no estudo da severidade da doença.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

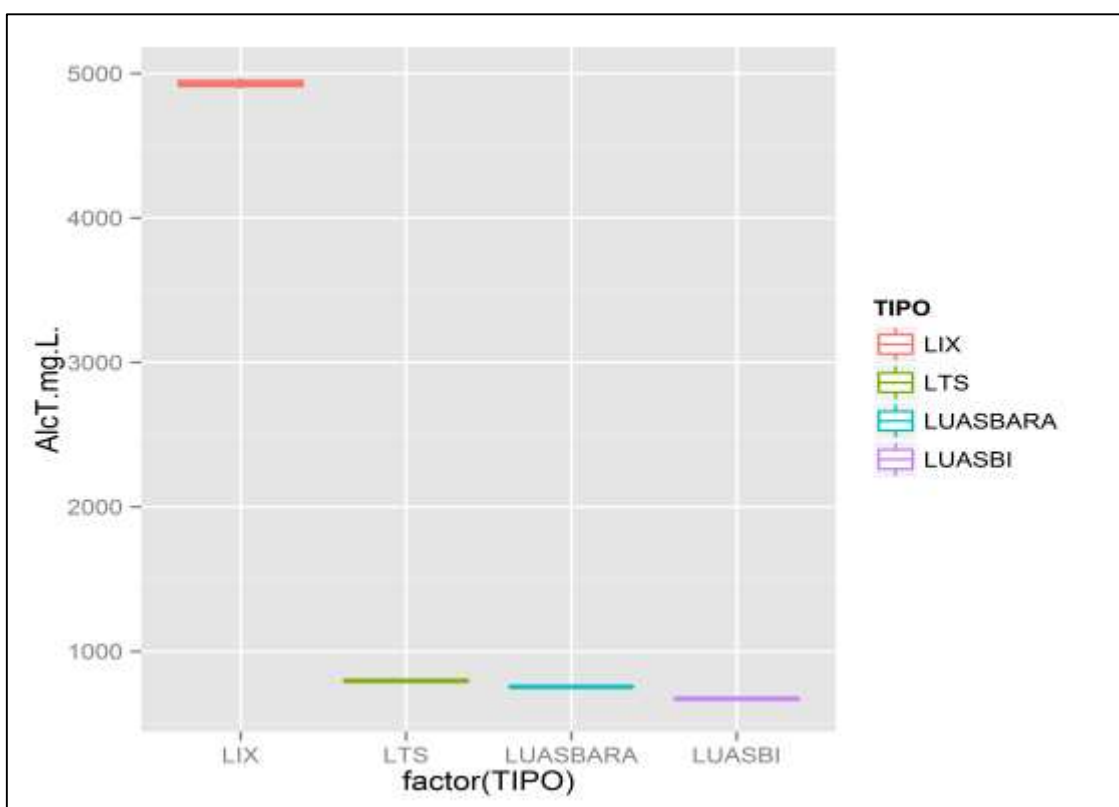
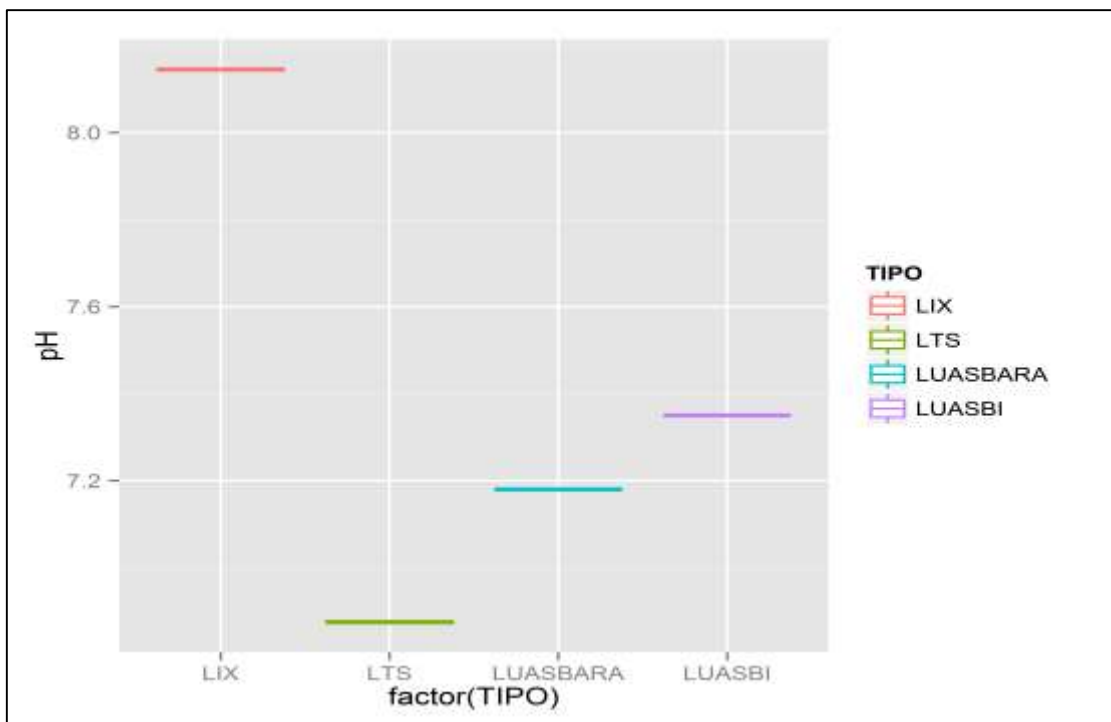
UNB CERRADO. **O que é compostagem?** Disponível em: <http://unbcerrado.blogspot.com.br/p/curiosidades.html> Acesso em: 29 de junho de 2014.

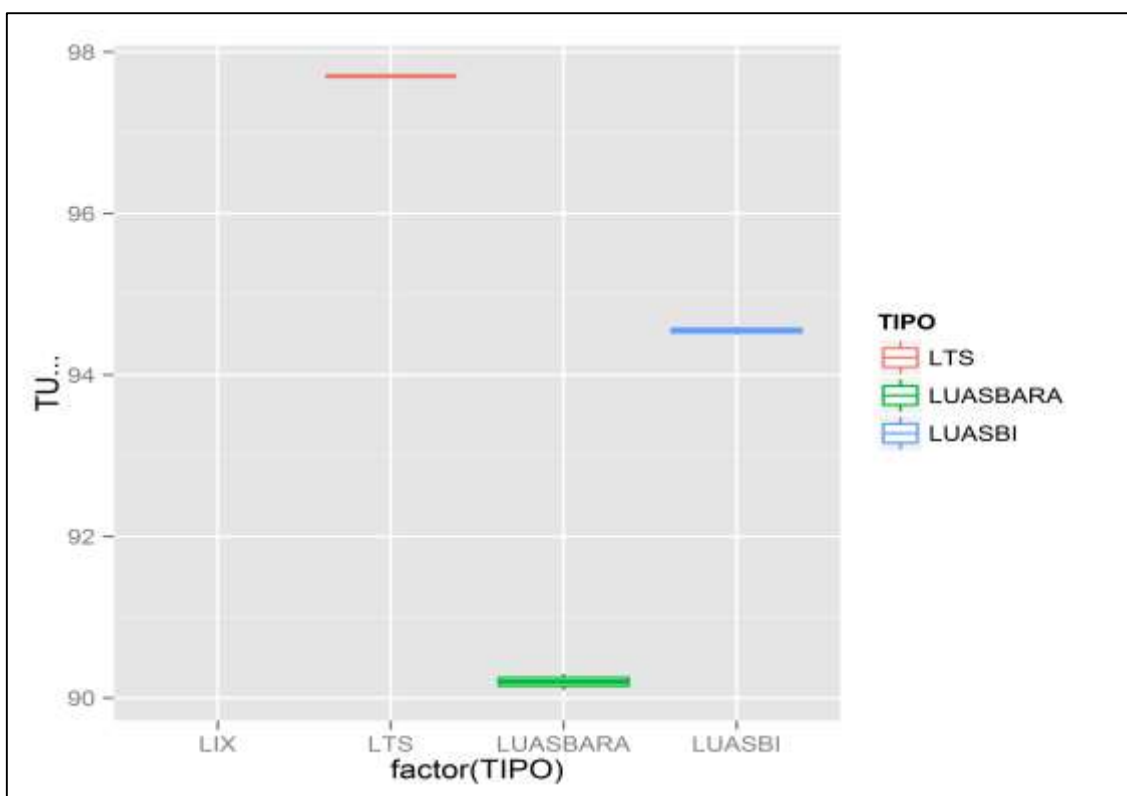
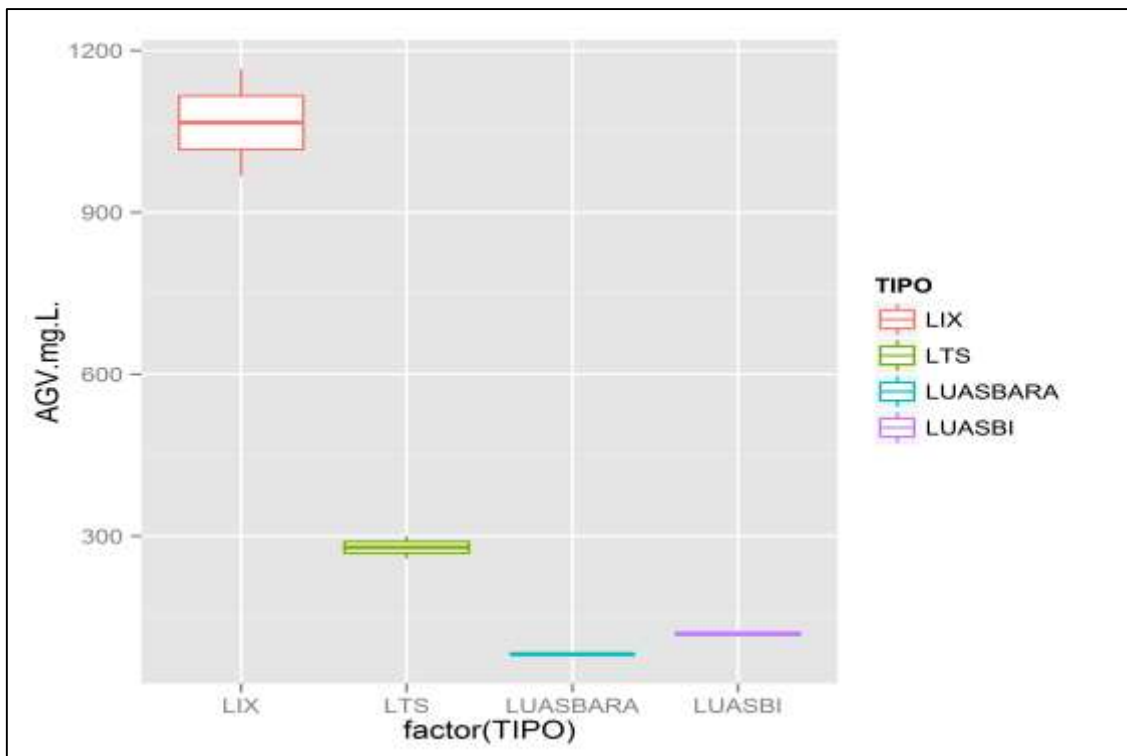
VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática.** Santa Maria: Departamento de Estatística UFSM., CCNE, , 2005.

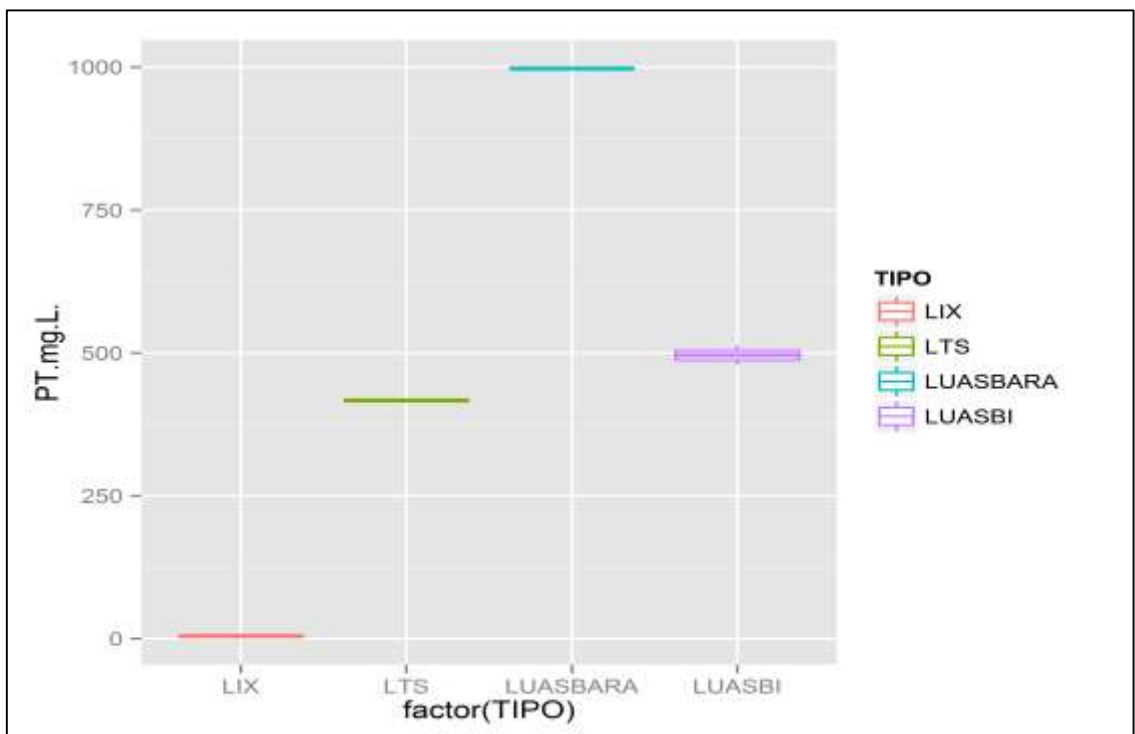
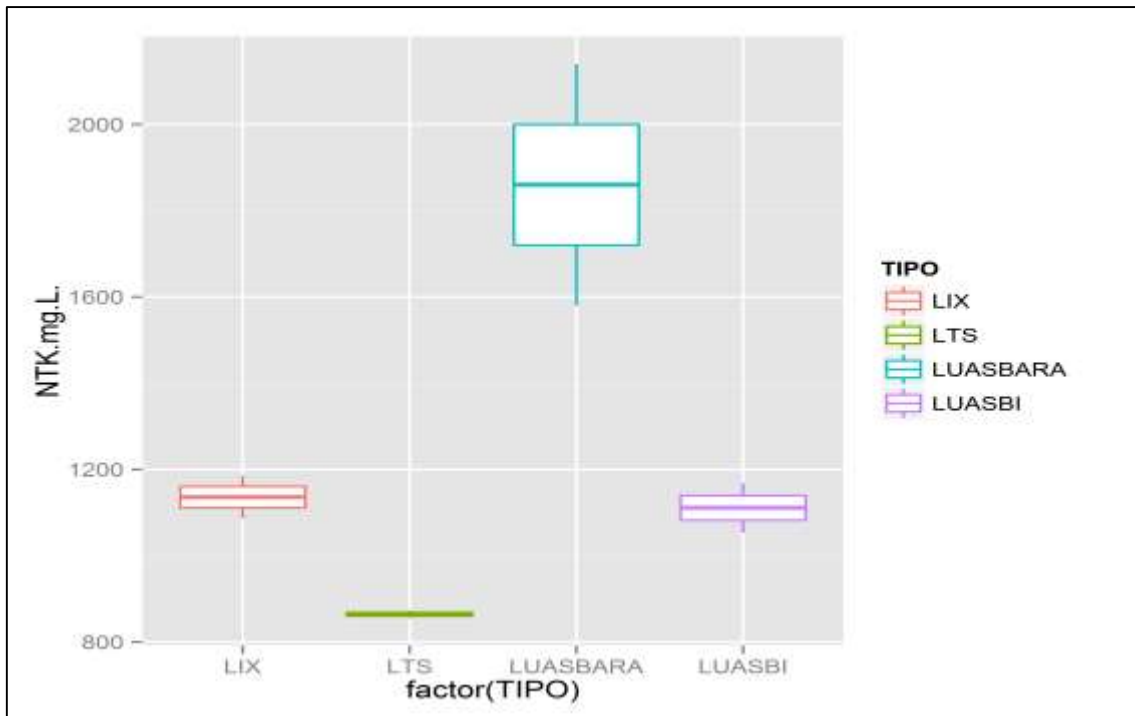
WIKIPEDIA. **Biogás.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Biog%C3%A1s> Acesso em: 29 de junho de 2014.

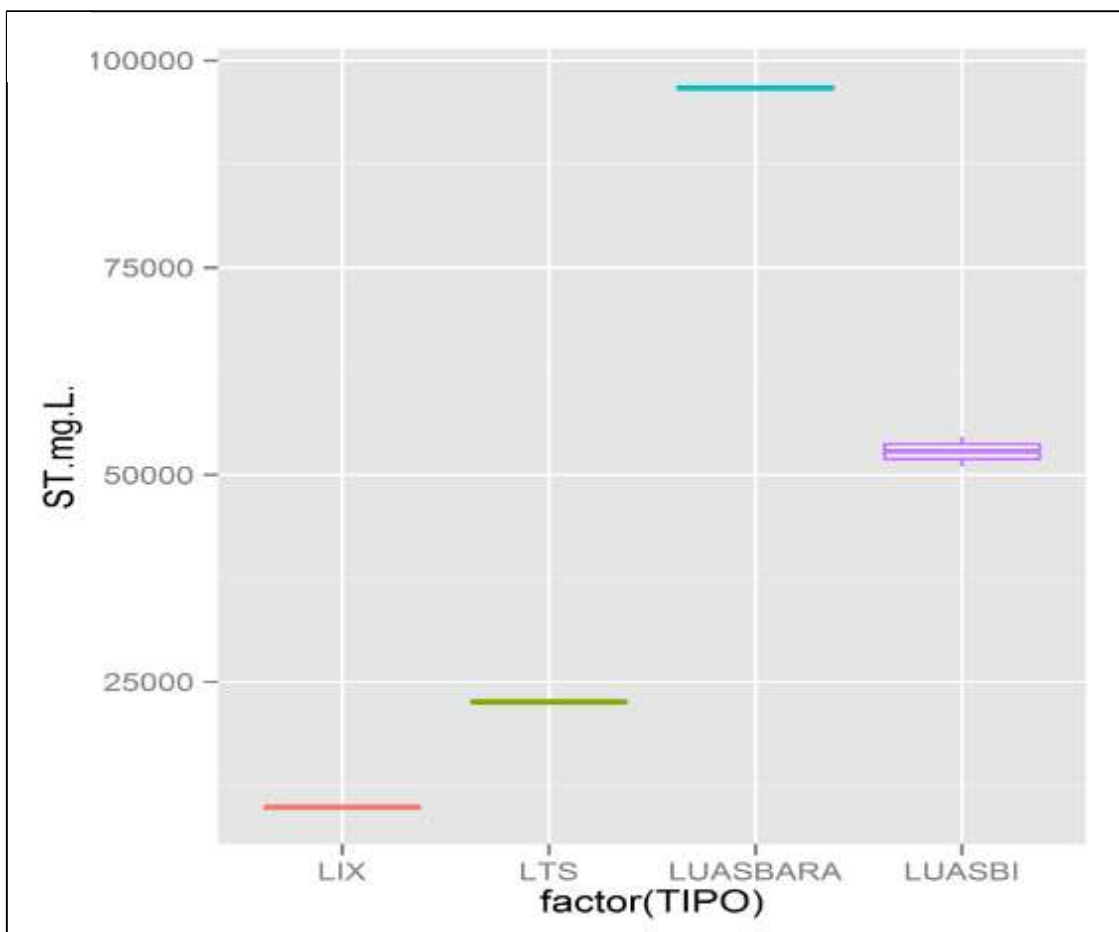
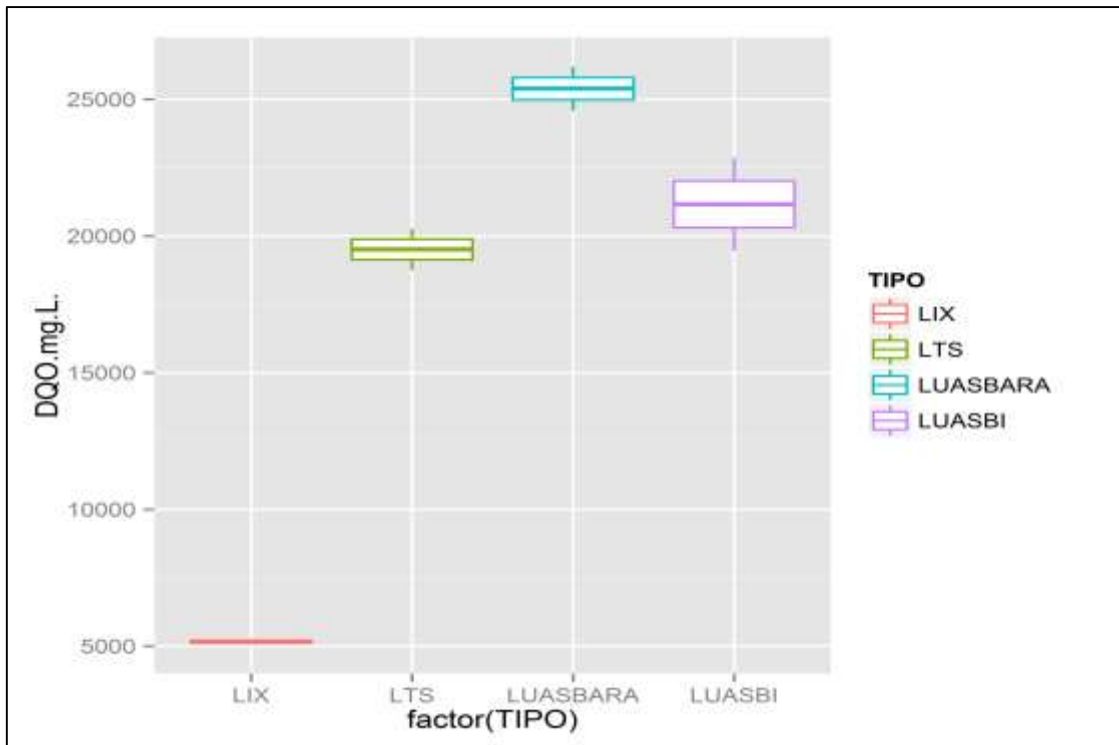
## APÊNDICES

## APÊNDICE A – BOX-PLOT COM PERCENTIS DE 25% E 75% PARA OS PARÂMETROS ANALISADOS DAS AMOSTRAS DE INÓCULOS.

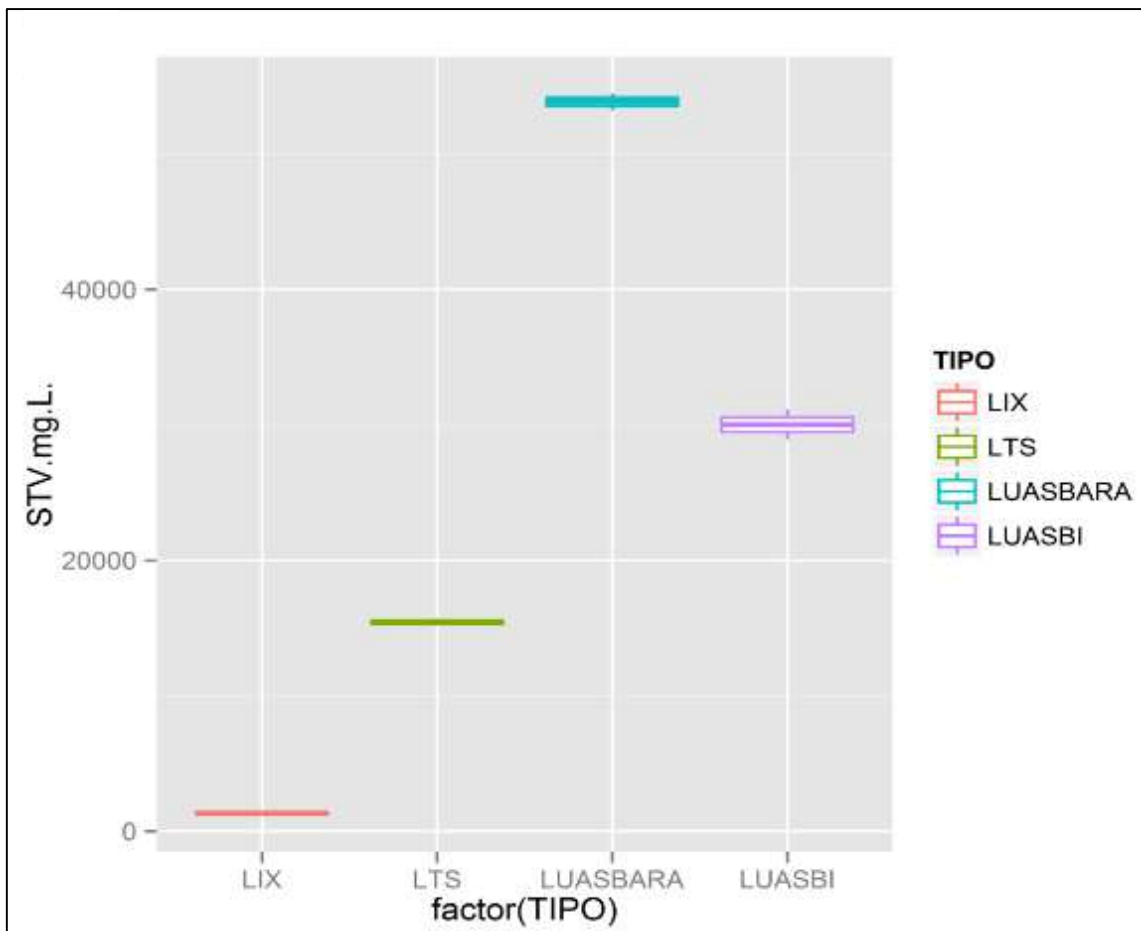












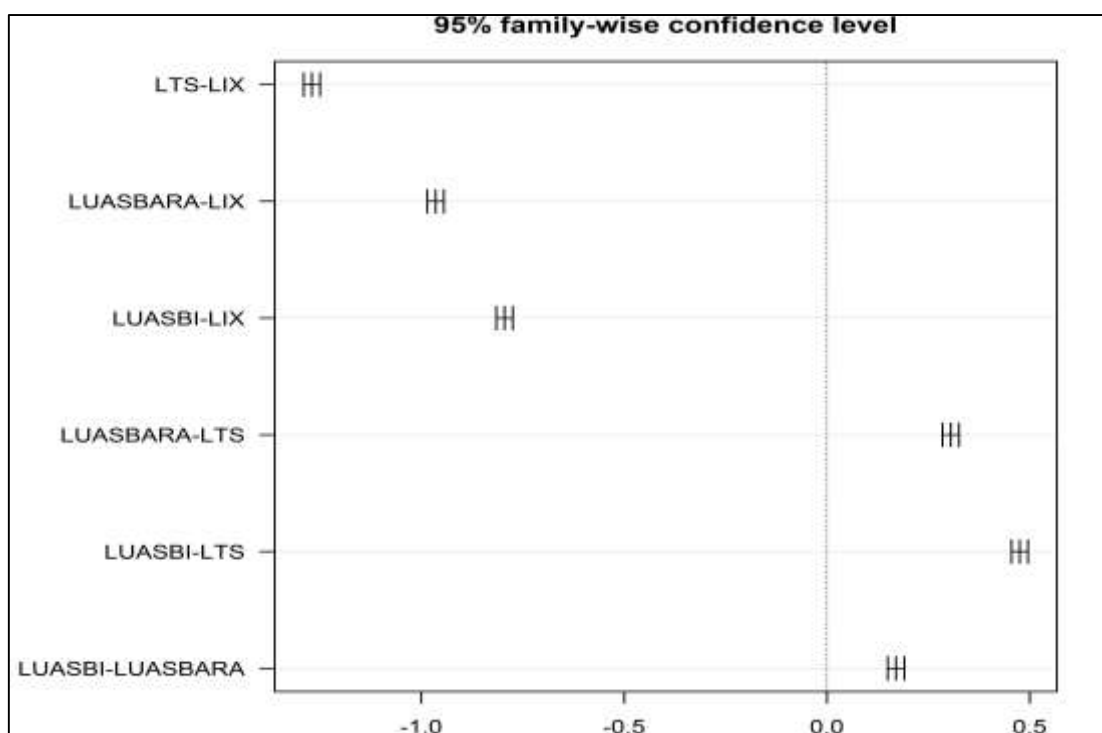
Onde:

LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3); LIX: Lixiviado coletado no ASMOC (Inóculo 4).

**APÊNDICE B – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DOS PARÂMETROS ANALISADOS ENTRE AMOSTRAS DOS INÓCULOS.**

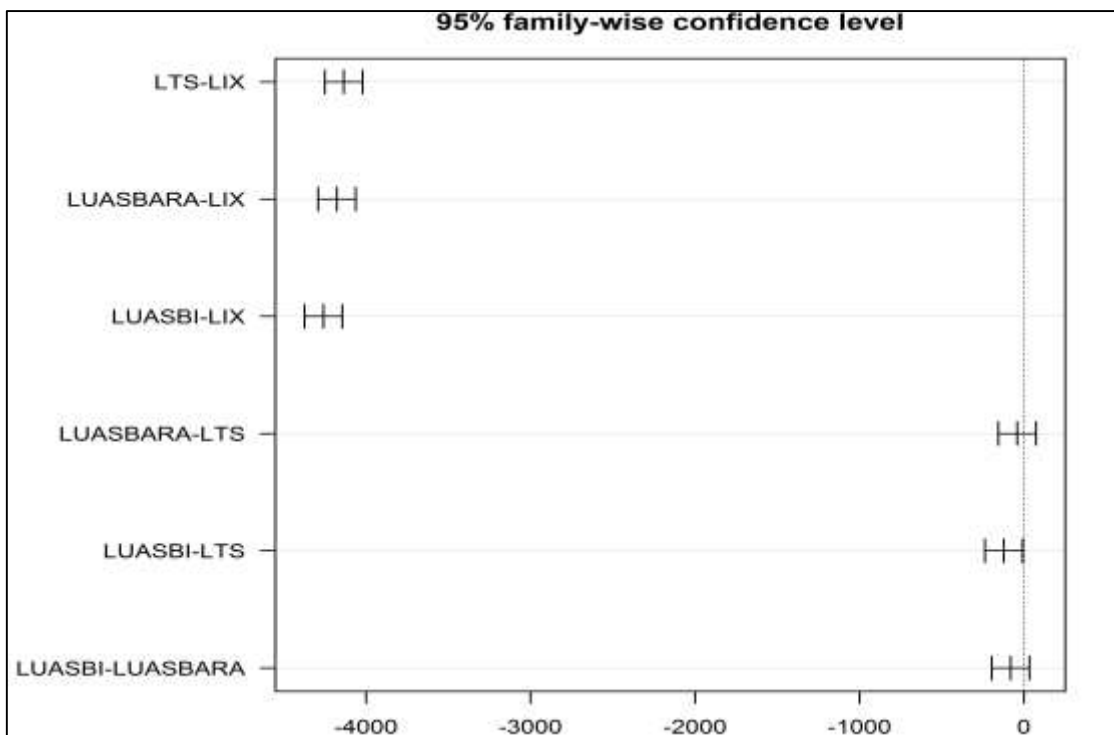
• pH

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	-1,27	-1,2903543	-12,496457	0,00E+00
LUASBARA-LIX	-0,965	-0,9853543	-0,9446457	0,00E+00
LUASBI-LIX	-0,795	-0,8153543	-0,7746457	0,00E+00
LUASBARA-LTS	0,305	0,2846457	0,3253543	0,00E+00
LUASBI-LTS	0,475	0,4546457	0,4953543	0,00E+00
LUASBI-LUASBARA	0,170	0,1496457	0,1903543	1,82E-05



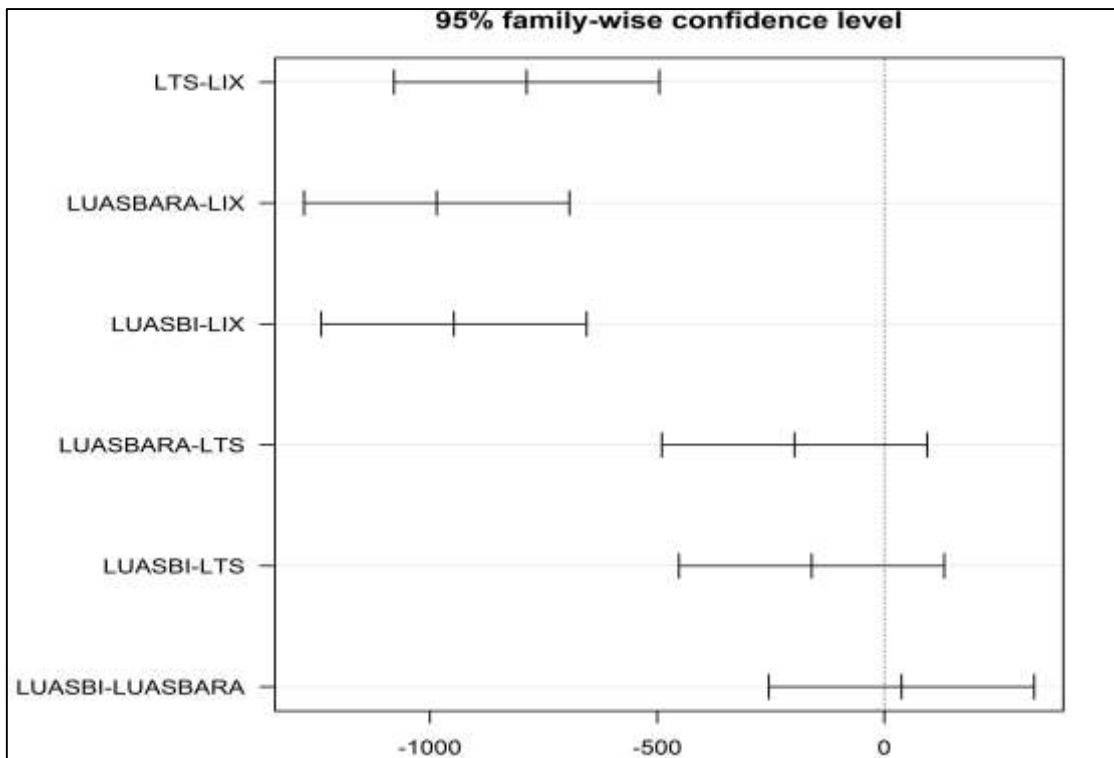
• Alcalinidade Total

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	-4.135,05	-4.249,3459	-4.020,754084	0,00E+00
LUASBARA-LIX	-4176,70	-4.290,9959	-4.062,404084	0,00E+00
LUASBI-LIX	-4259,05	-4.373,3459	-4.144,754084	0,00E+00
LUASBARA-LTS	-41,65	-155,9459	72,645916	0,5206540
LUASBI-LTS	-124,00	-238,2959	-9,704084	0,0383335
LUASBI-LUASBARA	-82,35	-196,6459	31,945916	0,1323120



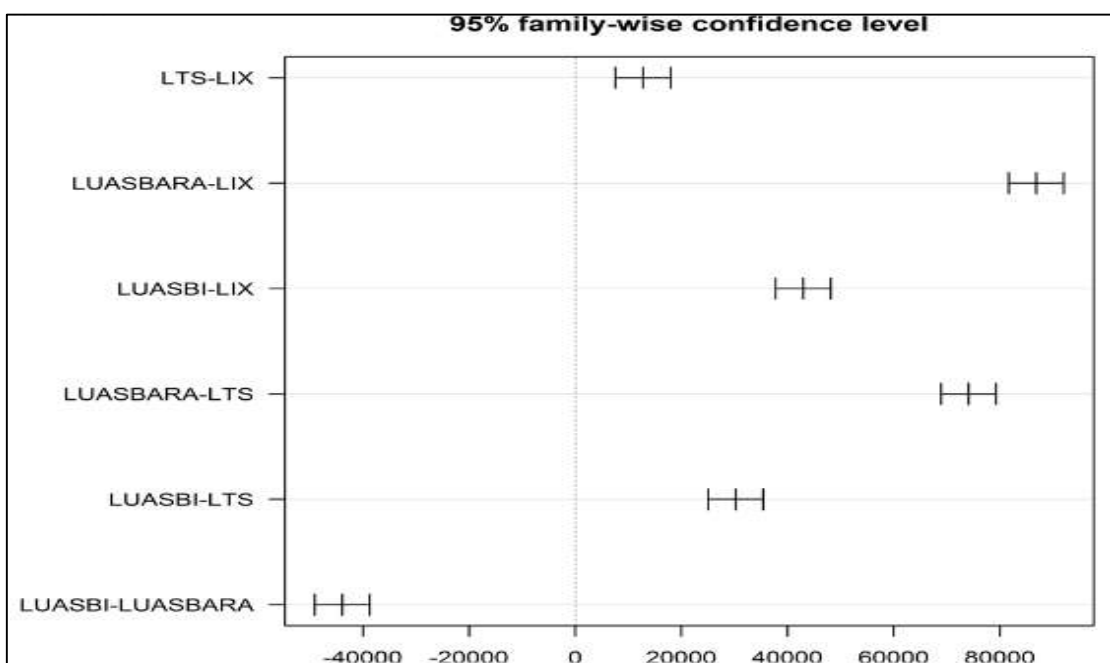
- Ácidos Graxos Voláteis

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	-787,25	-1.079,1416	-495,358440	0,0013669
LUASBARA-LIX	-985,20	-1.277,0916	-693,308440	0,0005664
LUASBI-LIX	-947,50	-1.239,3916	-655,608440	0,0006609
LUASBARA-LTS	-197,95	-489,8416	93,941560	0,1552744
LUASBI-LTS	-160,25	-452,1416	131,641560	0,2565678
LUASBI-LUASBARA	37,70	-254,1916	329,591560	0,9483909



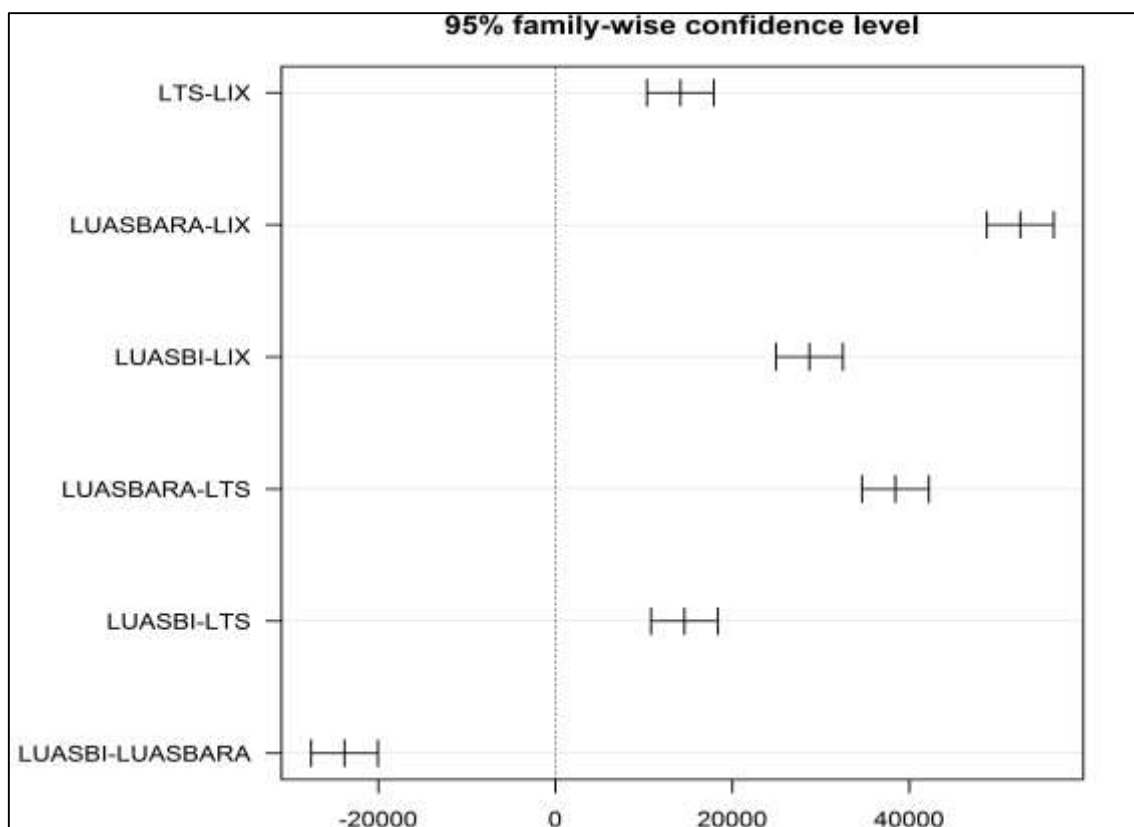
- Sólidos Totais

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	12.740	7.545,551	17.934,45	0,0019742
LUASBARA-LIX	86.840	81.645,551	92.034,45	0,0000000
LUASBI-LIX	42960	37.765,551	48.154,45	0,0000193
LUASBARA-LTS	74100	68.905,551	79.294,45	0,0000000
LUASBI-LTS	30220	25.025,551	35.414,45	0,0000901
LUASBI-LUASBARA	-43880	-49.074,449	-38.685,55	0,0000169



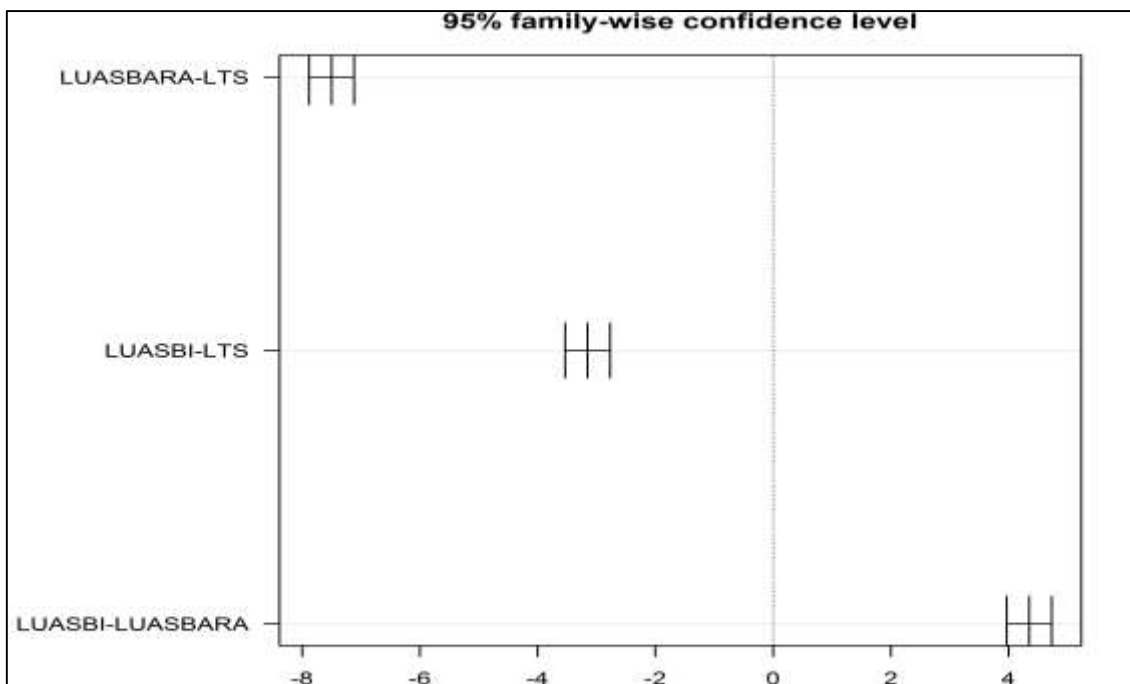
- Sólidos Totais Voláteis

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	14.120	10.345,28	17.894,72	0,0003785
LUASBARA-LIX	52.540	48.765,28	56.314,72	0,0000001
LUASBI-LIX	28700	24.925,28	32.474,72	0,0000311
LUASBARA-LTS	38420	34.645,28	42.194,72	0,0000039
LUASBI-LTS	14580	10.805,28	18.354,72	0,0003347
LUASBI-LUASBARA	-23840	-27.614,72	-20.065,28	0,0000688



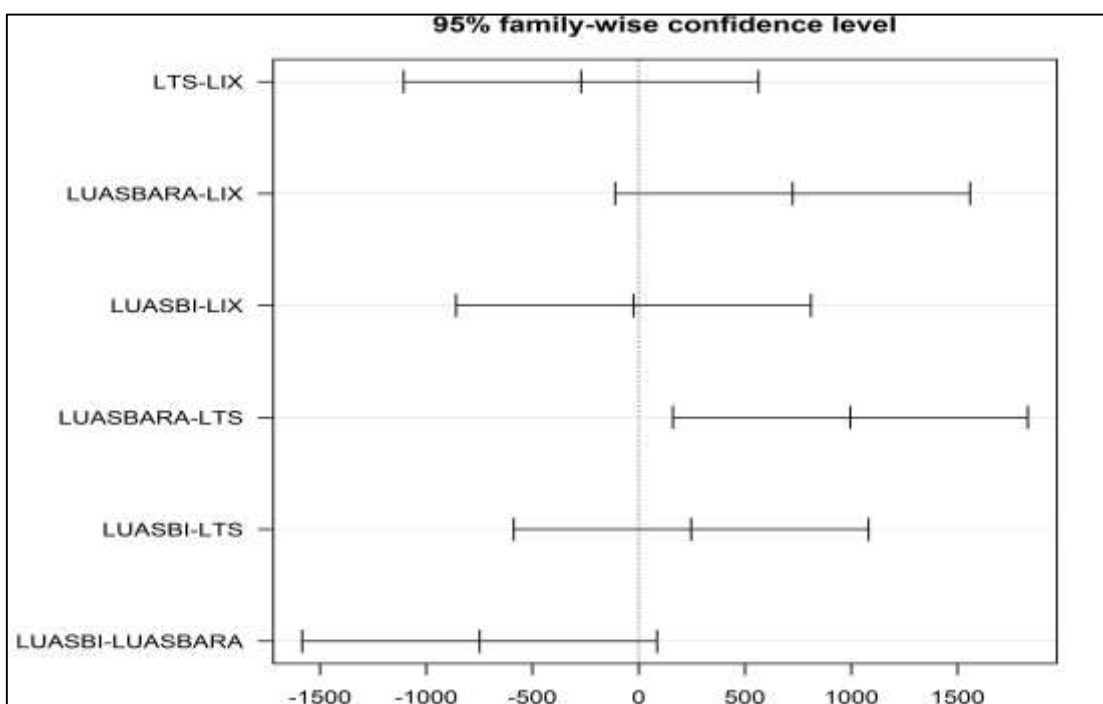
- Teor de Umidade

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LUASBARA-LTS	-7,50	-7,881467	-7,118533	0,00E+00
LUASBI-LTS	-3,15	-3,531467	-2,768533	1,76E-05
LUASBI-LUASBARA	4,35	3,968533	4,731467	0,00E+00



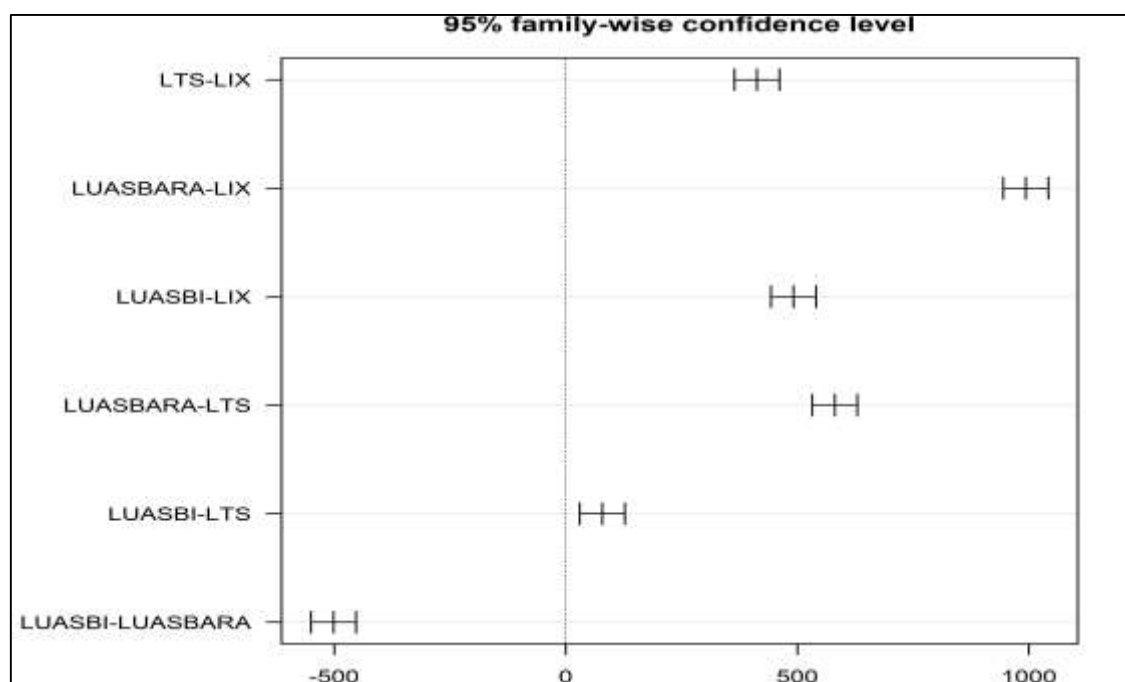
- Nitrogênio Total Kjeldhal

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	-271,55	-1.106,5329	563,43291	0,5963974
LUASBARA-LIX	724,25	-110,7329	1.559,23291	0,0778527
LUASBI-LIX	-24,7	-859,6829	810,28291	0,9992700
LUASBARA-LTS	995,8	160,8171	1.830,78291	0,0278859
LUASBI-LTS	246,85	-588,1329	1.081,83291	0,6563538
LUASBI-LUASBARA	-748,95	-1.583,9329	86,03291	0,0703198



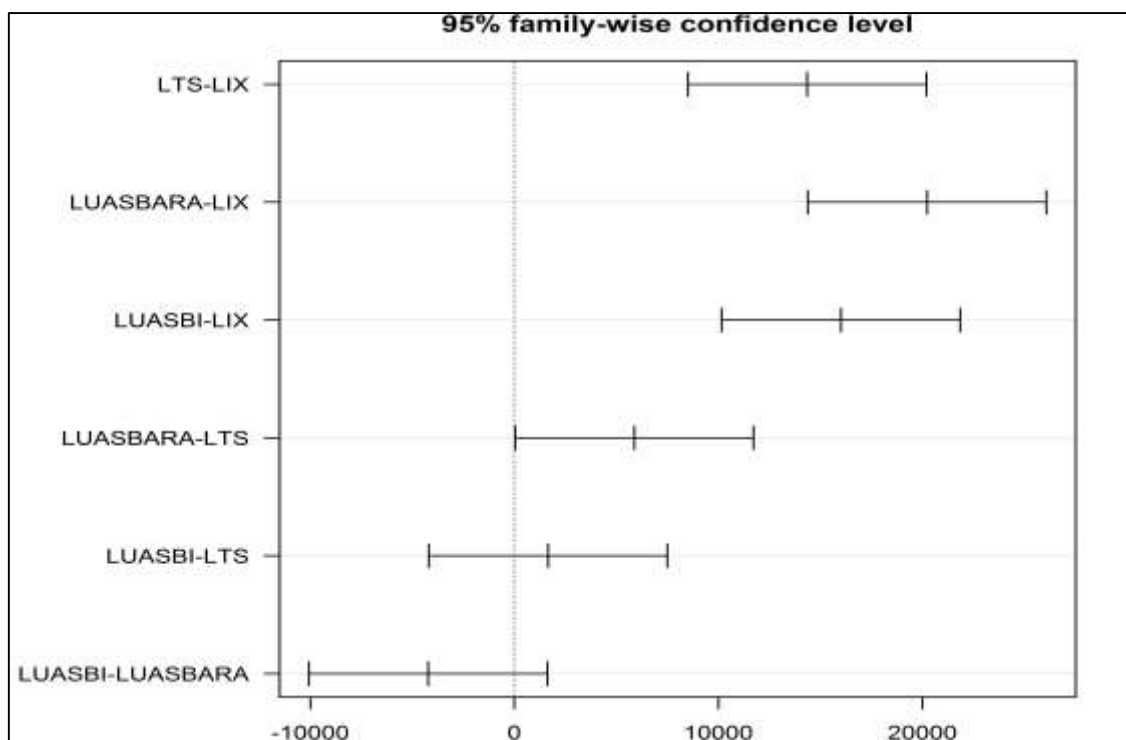
- Fósforo Total

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	412,55	363,89498	461,205	0,0000165
LUASBARA-LIX	993,25	944,59498	1.041,905	0,0000000
LUASBI-LIX	491,45	442,79498	540,105	0,0000042
LUASBARA-LTS	580,70	532,04498	629,355	0,0000007
LUASBI-LTS	78,90	30,24498	127,555	0,0093768
LUASBI-LUASBARA	-501,80	550,45502	-453,145	0,0000034



- Demanda Química de Oxigênio

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
LTS-LIX	14.350,0	8.505,34066	20.194,659	0,0019661
LUASBARA-LIX	20.227,5	14.382,84066	26.072,159	0,0005131
LUASBI-LIX	16.000,0	10.155,34066	21.844,659	0,0012899
LUASBARA-LTS	5.877,5	32,84066	11.722,159	0,0491078
LUASBI-LTS	1.650,0	-4.194,65934	7.494,659	0,6837361
LUASBI-LUASBARA	-4.227,5	-10.072,15934	1.617,159	0,1309268



Onde:

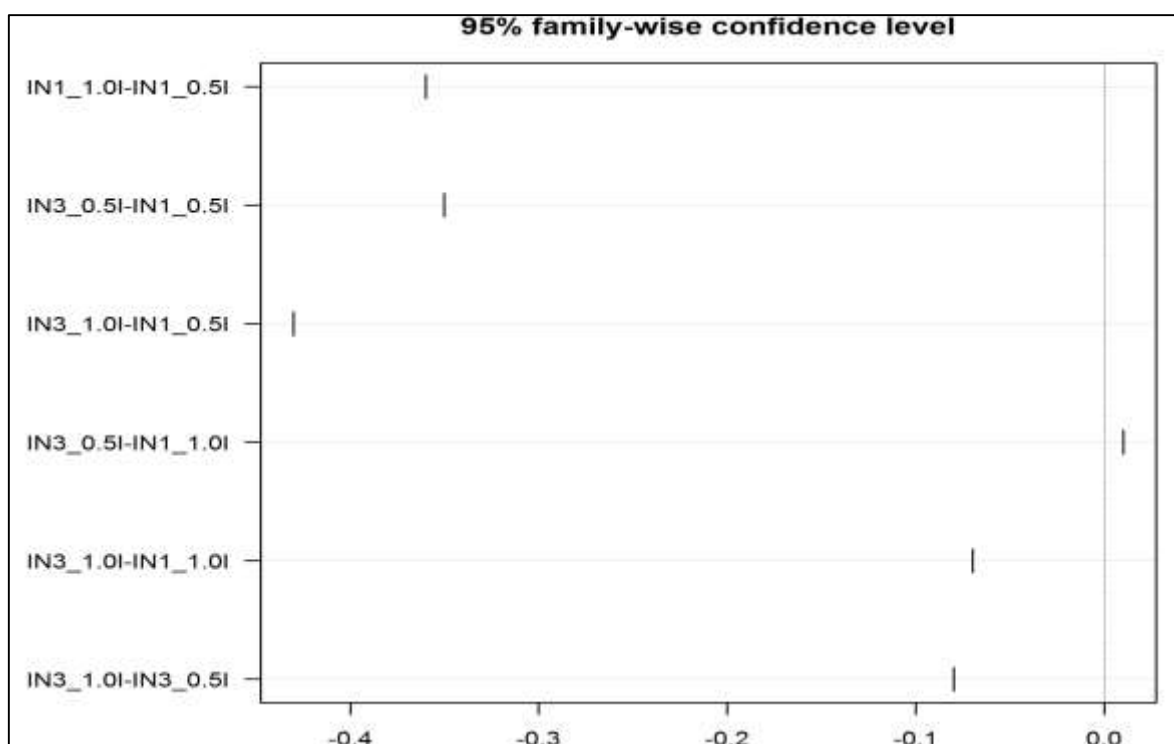
LUASBAARA: Lodo de reator UASB da ETE – Aracapé (Inóculo 1); LTS: Lodo de Tanque Séptico (Inóculo 2); LUASBI: Lodo de reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3); LIX: Lixiviado coletado no ASMOC (Inóculo 4).



**APÊNDICE C – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DOS PARÂMETROS ANALISADOS ENTRE OS MEIOS DE REAÇÕES - INICIAL.**

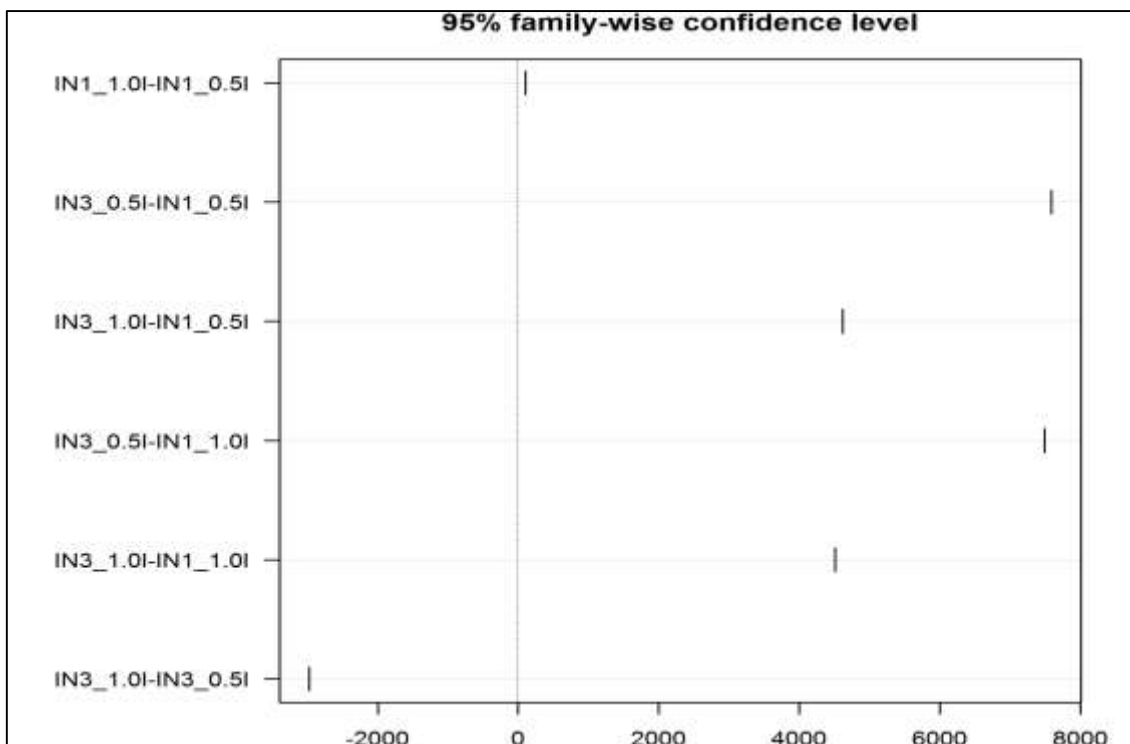
• pH

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-0,36	-0,36	-0,36	0,00
IN3_0.5I-IN1_0.5I	-0,35	-0,35	-0,35	0,00
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-0,43	-0,43	-0,43	0,00
IN3_0.5I-IN1_1.0I	0,01	0,01	0,01	0,00
IN3_1.0I-IN1_1.0I	-0,07	-0,07	-0,07	0,00
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-0,08	-0,08	-0,08	0,00



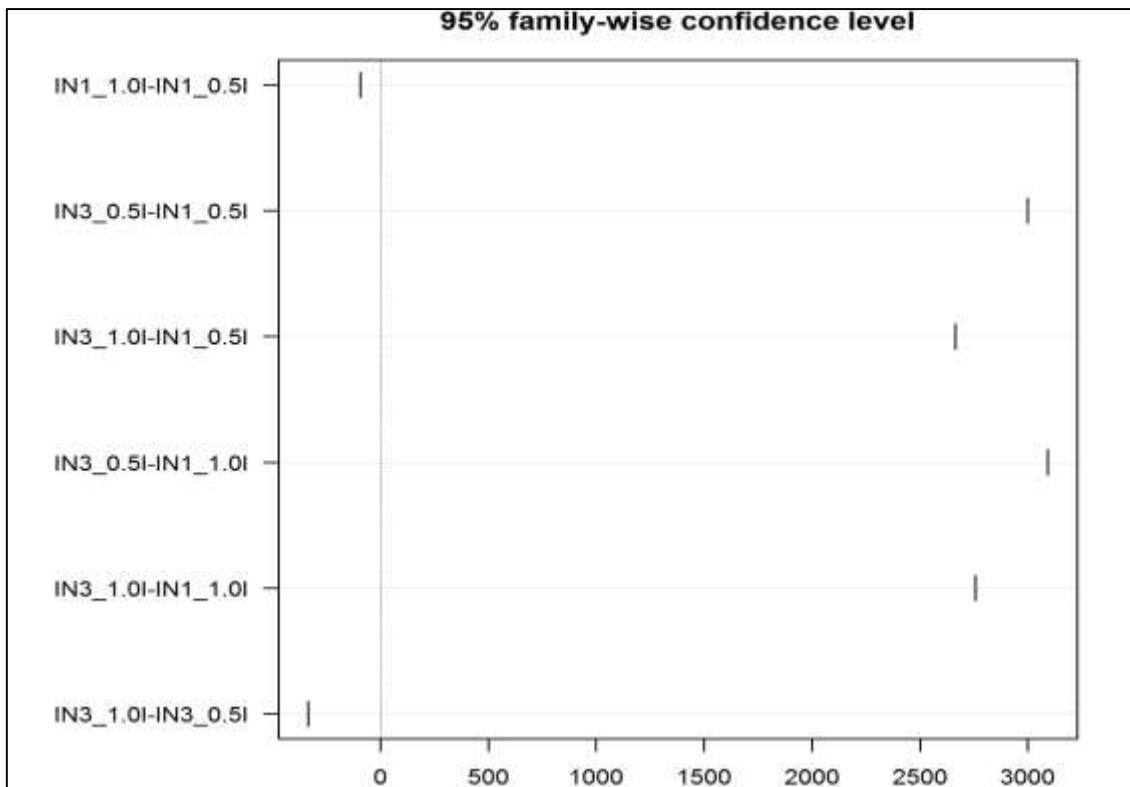
• Alcalinidade

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	100,8538	100,8538	100,8538	0,00
IN3_0.5I-IN1_0.5I	7.594,7349	7.594,7349	7.594,7349	0,00
IN3_1.0I-IN1_0.5I	4.615,2829	4.615,2829	4.615,2829	0,00
IN3_0.5I-IN1_1.0I	7.493,8812	7.493,8812	7.493,8812	0,00
IN3_1.0I-IN1_1.0I	4.514,4292	4.514,4292	4.514,4292	0,00
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-2.979,4520	-2.979,4520	-2.979,4520	0,00



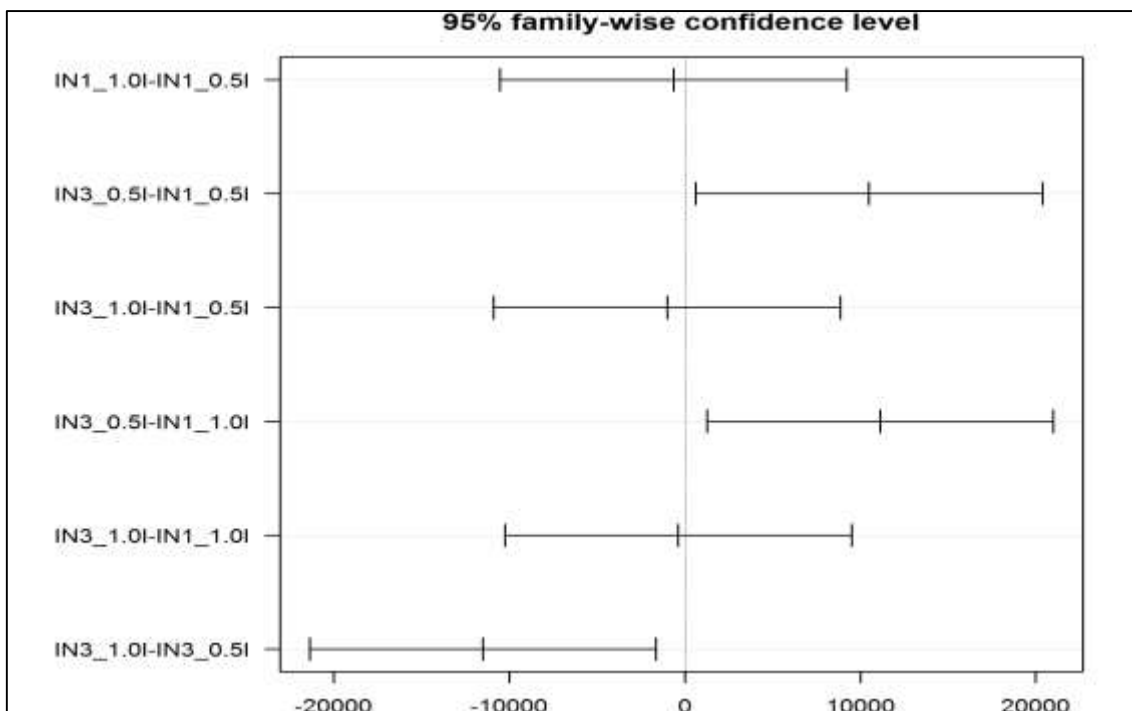
- Ácidos Graxos Voláteis

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-93,74593	-93,74593	-93,74593	0,00
IN3_0.5I-IN1_0.5I	2.999,37367	2.999,37367	2.999,37367	0,00
IN3_1.0I-IN1_0.5I	2.663,70792	2.663,70792	2.663,70792	0,00
IN3_0.5I-IN1_1.0I	3.093,11960	3.093,11960	3.093,11960	0,00
IN3_1.0I-IN1_1.0I	2.757,45385	2.757,45385	2.757,45385	0,00
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-335,66575	-335,66575	-335,66575	0,00



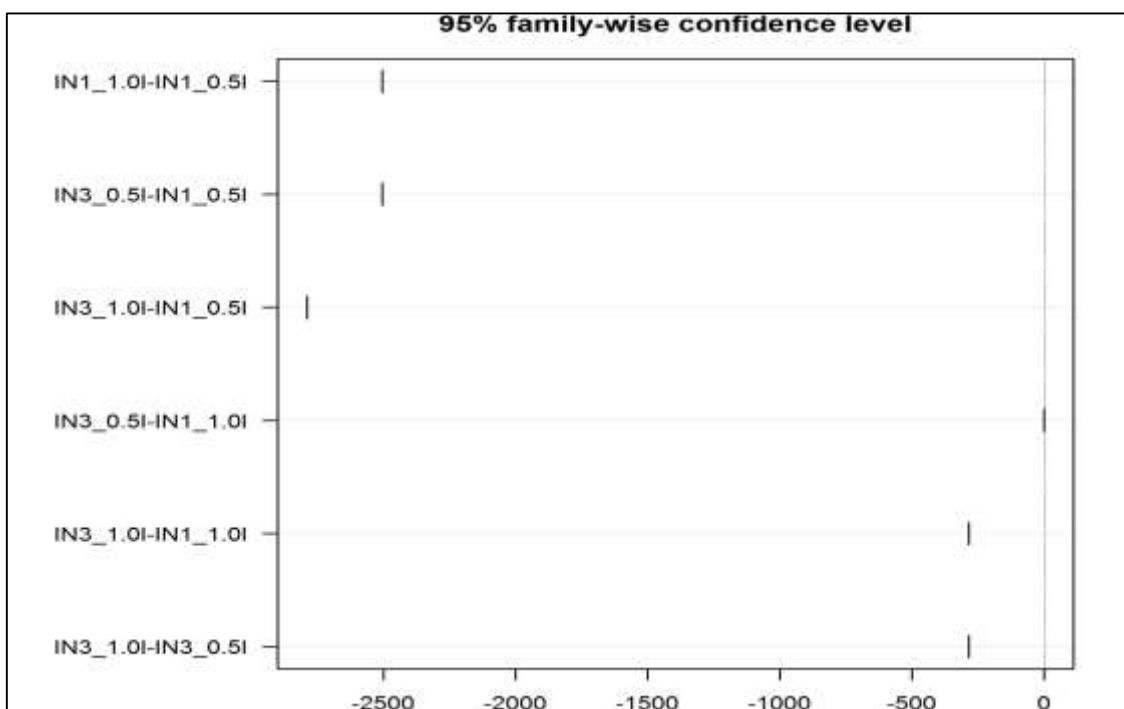
- Sólidos Totais

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-640	-10.515,5789	9.235,579	0,9925927
IN3_0.5I-IN1_0.5I	10.490	614,4211	20.365,579	0,0410998
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-1.010	-10.885,5789	8.865,579	0,9727239
IN3_0.5I-IN1_1.0I	11.130	1.254,4211	21.005,579	0,0337656
IN3_1.0I-IN1_1.0I	-370	-10.245,5789	9.505,579	0,9985253
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-11.500	-21.375,5789	-1.624,421	0,0302418



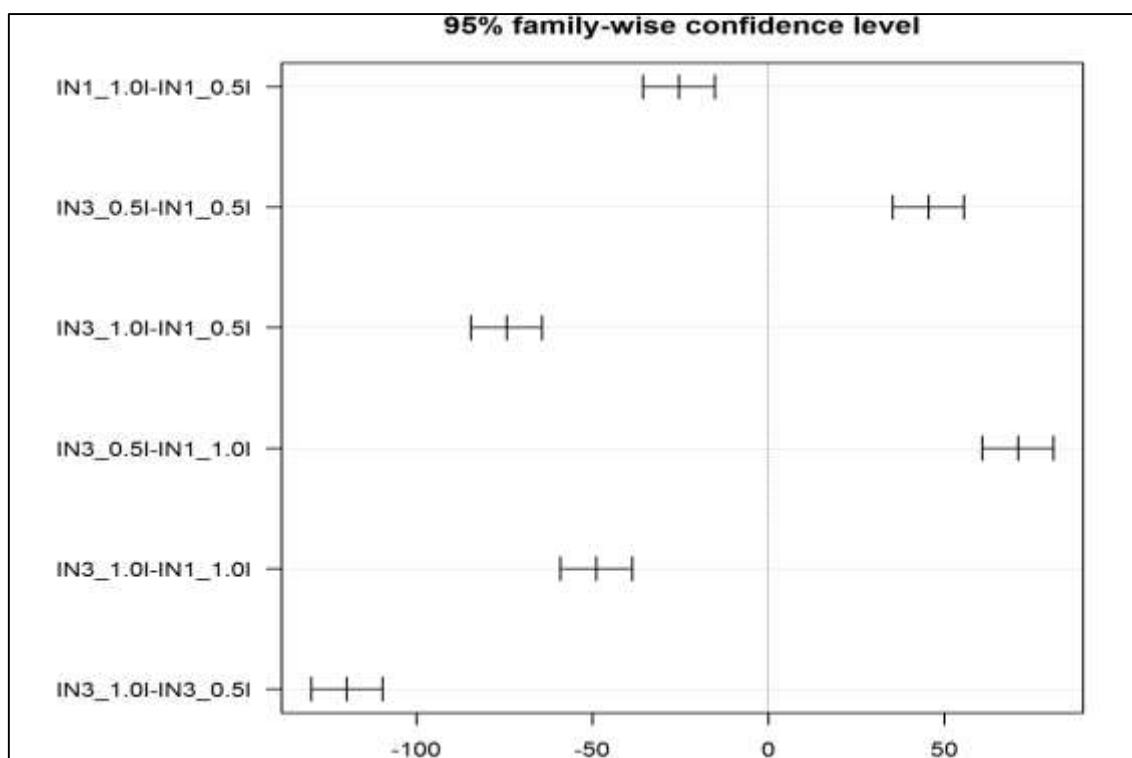
- Nitrogênio Total Kjeldhal

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-2.504.065.000	-2.504.065.000	-2.504.065.000	0,00
IN3_0.5I-IN1_0.5I	-2.504.065.000	-2.504.065.000	-2.504.065.000	0,00
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-2.788.618.000	-2.788.618.000	-2.788.618.000	0,00
IN3_0.5I-IN1_1.0I	3,410605E-13	1,169881E-12	1,852002E-12	0,7978522
IN3_1.0I-IN1_1.0I	-284.552.800	-284.552.800	-284.552.800	0,00
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-284.552.800	-284.552.800	-284.552.800	0,00



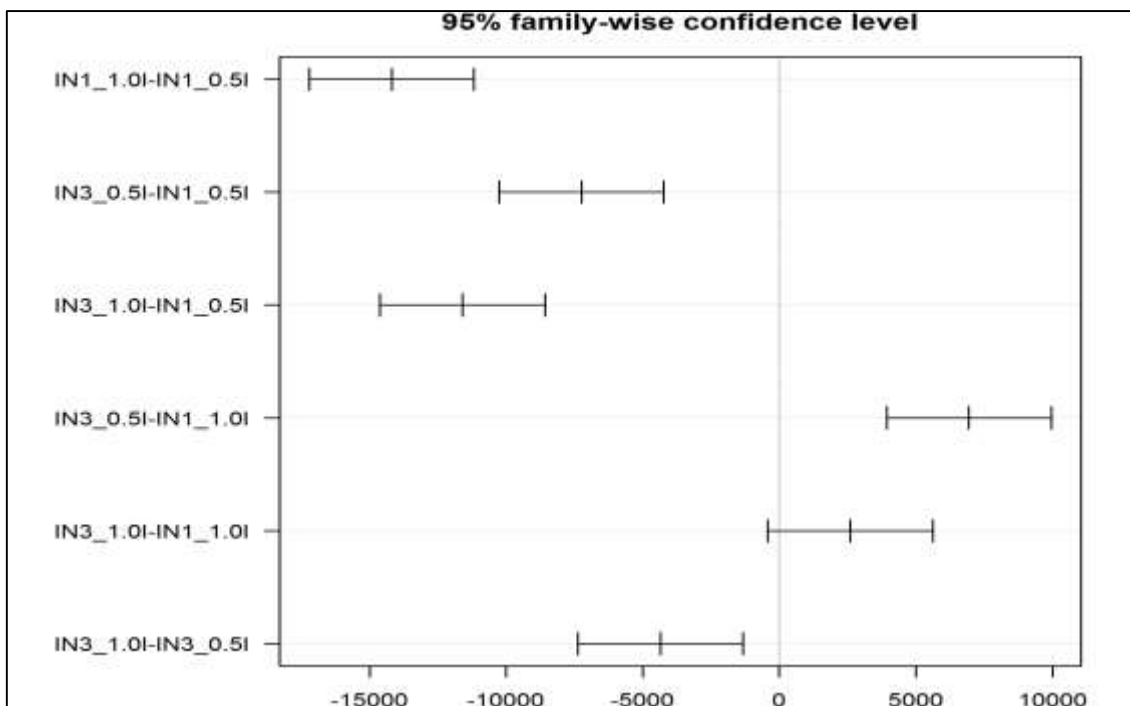
- Fósforo Total

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-25,48020	-35,63558	-15,32483	0,0018084
IN3_0.5I-IN1_0.5I	45,47236	35,31699	55,62774	0,0001976
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-74,47908	-84,63446	-64,32371	0,0000372
IN3_0.5I-IN1_1.0I	70,95257	60,79720	81,10794	0,0000464
IN3_1.0I-IN1_1.0I	-48,99888	-59,15425	-38,84351	0,0001562
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-11,99515	-130,10682	-109,79608	0,0000007



- Demanda Química de Oxigênio

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0I-IN1_0.5I	-14.200	-17.222,4557	-11.177,544	0,0001695
IN3_0.5I-IN1_0.5I	-7.250	-10.272,4557	-4.227,544	0,0021504
IN3_1.0I-IN1_0.5I	-11.600	-14.622,4557	-8.577,544	0,0003430
IN3_0.5I-IN1_1.0I	6.950	3.927,5443	9.972,456	0,0025289
IN3_1.0I-IN1_1.0I	2.600	-422,4557	5.622,456	0,0798136
IN3_1.0I-IN3_0.5I	-4.350	-7.372,4557	-1.327,544	0,0144446



Onde:

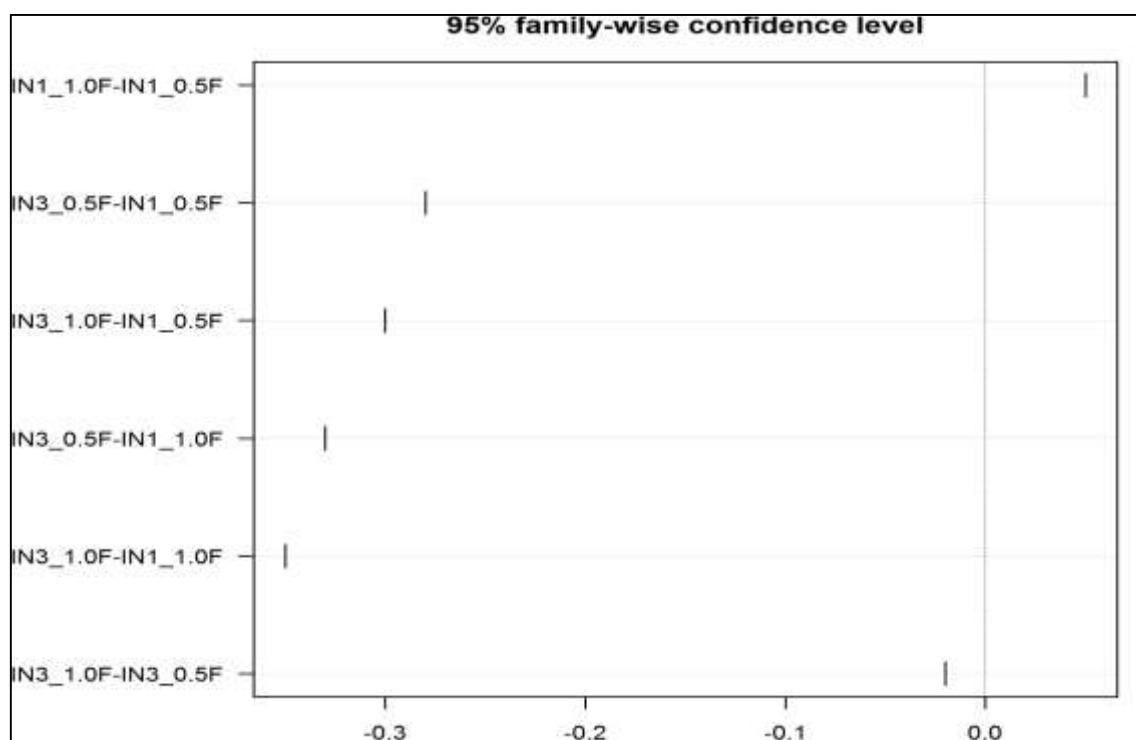
IN1\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1\_1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3\_1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

O primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após \_ indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I indica se a caracterização foi realizada antes do teste de biodegradabilidade.

**APÊNDICE D – RESULTADO DO TESTE DE TUKEY PARA COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DOS PARÂMETROS ANALISADOS ENTRE OS MEIOS DE REAÇÕES - FINAL.**

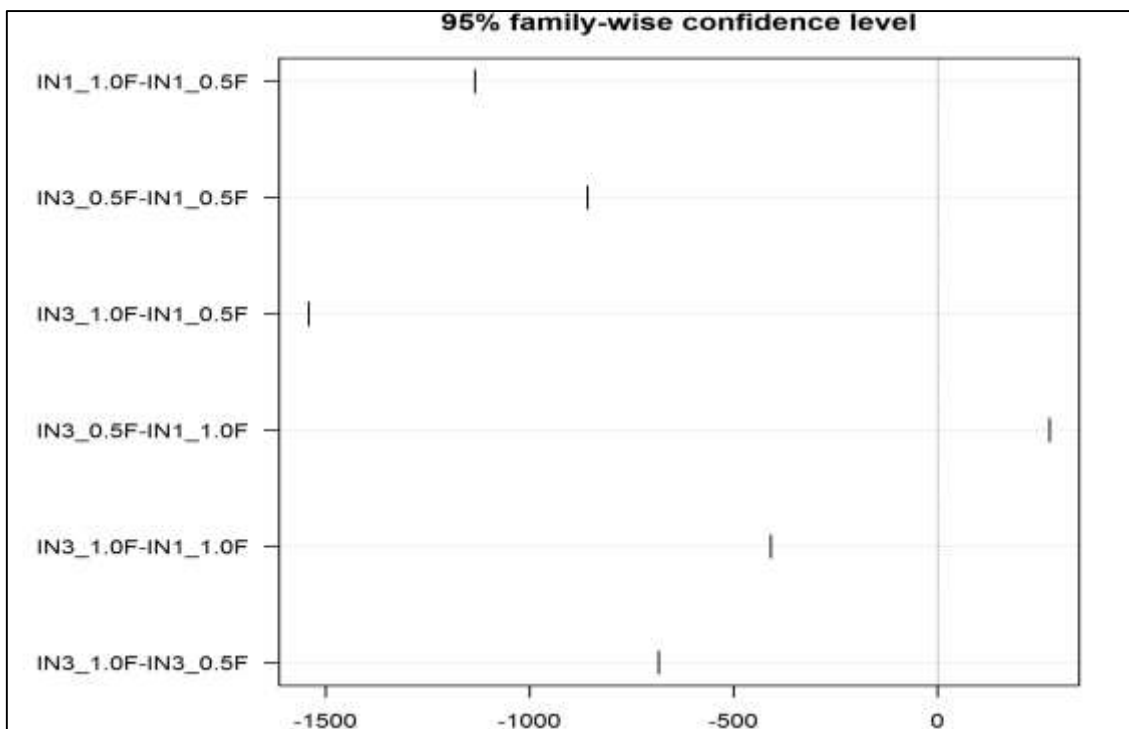
• pH

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	0,05	0,05	0,05	0,00
IN3_0.5F-IN1_0.5F	-0,28	-0,28	-0,28	0,00
IN3_1.0F-IN1_0.5F	-0,30	-0,30	-0,30	0,00
IN3_0.5F-IN1_1.0F	-0,33	-0,33	-0,33	0,00
IN3_1.0F-IN1_1.0F	-0,35	-0,35	-0,35	0,00
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-0,02	-0,02	-0,02	0,00



• Alcalinidade Total

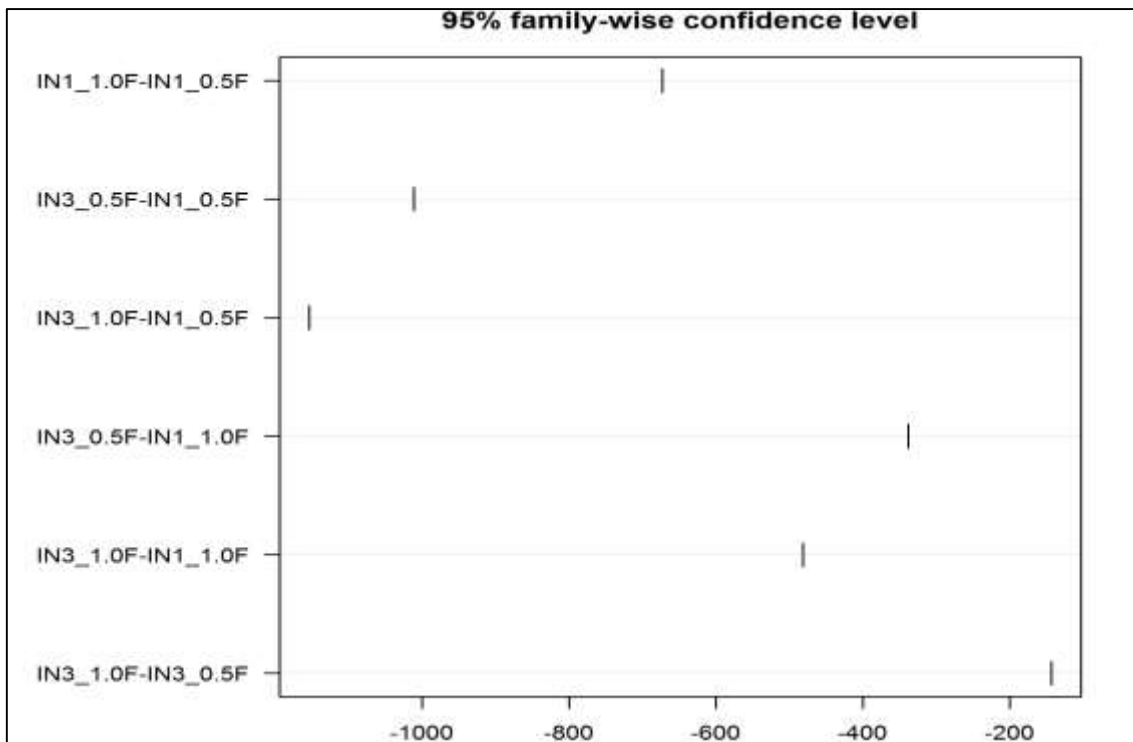
Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	-1.134,0679	-1.134,0679	-1.134,0679	0,00
IN3_0.5F-IN1_0.5F	-858,5858	-858,5858	-858,5858	0,00
IN3_1.0F-IN1_0.5F	-1.542,6996	-1.542,6996	-1.542,6996	0,00
IN3_0.5F-IN1_1.0F	275,4821	275,4821	275,4821	0,00
IN3_1.0F-IN1_1.0F	-408,6318	-408,6318	-408,6318	0,00
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-684,1138	-684,1138	-684,1138	0,00



- Ácidos Graxos Voláteis

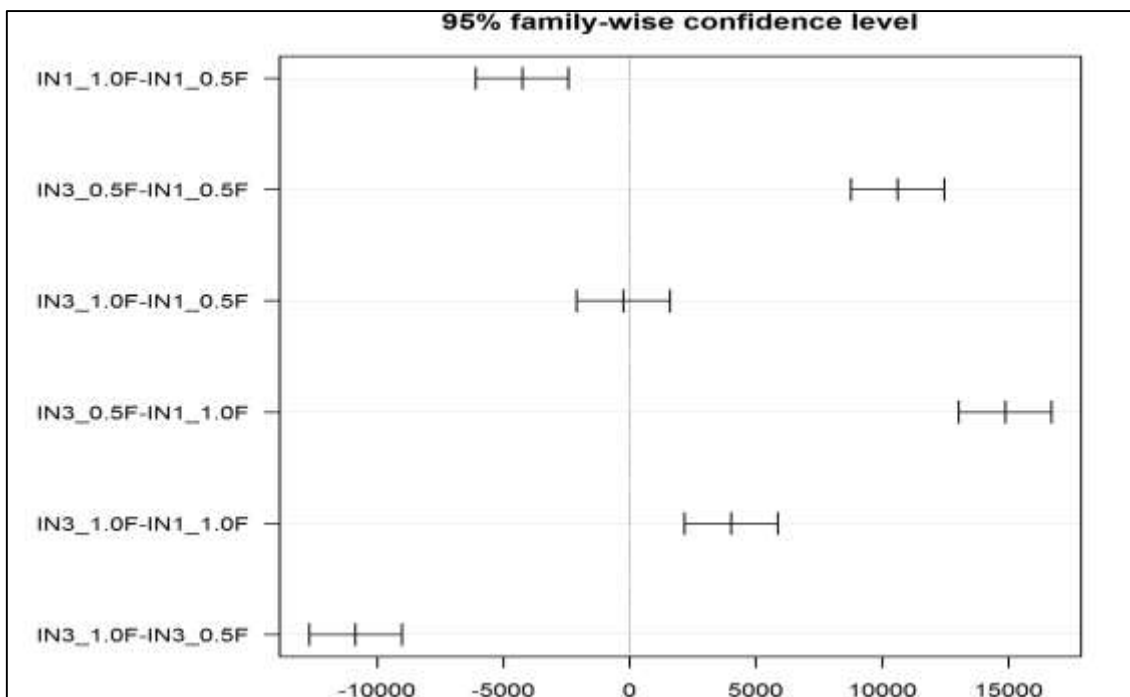
Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	-672,5996	-672,5996	-672,5996	0,00
IN3_0.5F-IN1_0.5F	-1.010,9753	-1.010,9753	-1.010,9753	0,00
IN3_1.0F-IN1_0.5F	-1.154,0169	-1.154,0169	-1.154,0169	0,00
IN3_0.5F-IN1_1.0F	-338,3757	-338,3757	-338,3757	0,00
IN3_1.0F-IN1_1.0F	-481,4173	-481,4173	-481,4173	0,00
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-143,0416	-143,0416	-143,0416	0,00





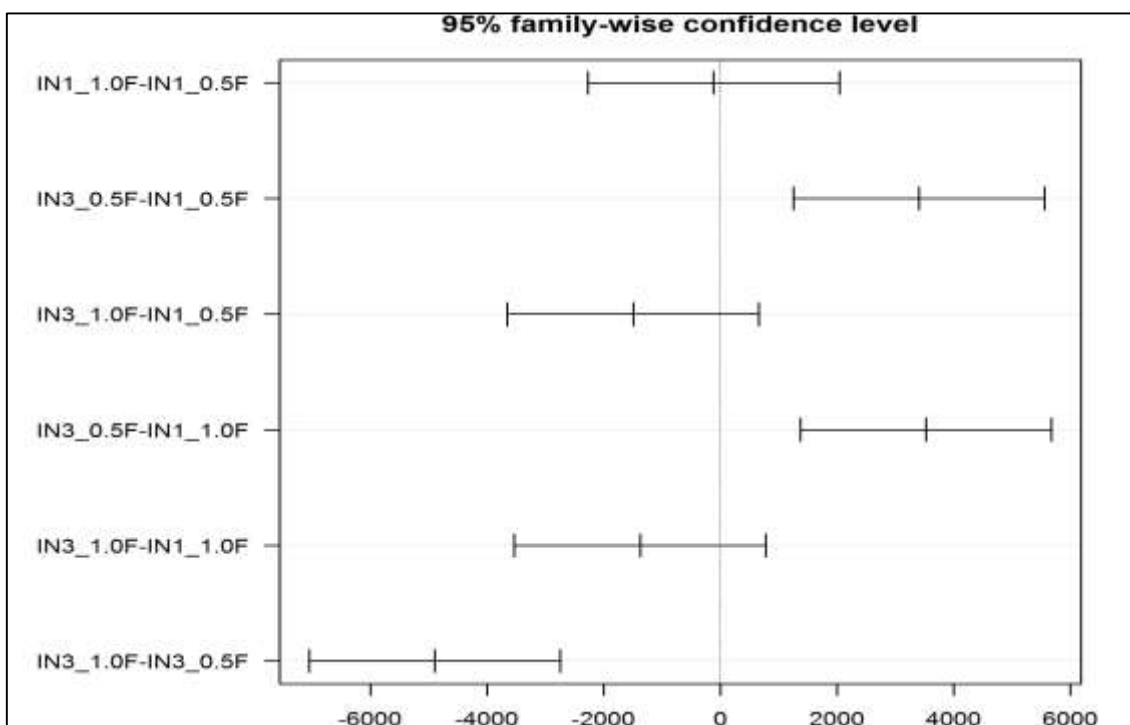
- Sólidos Totais

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	-4.260	-6.101,809	-2.418,191	0,0024729
IN3_0.5F-IN1_0.5F	10.610	8.768,191	12.451,809	0,0000929
IN3_1.0F-IN1_0.5F	-250	-2.091,809	1.591,809	0,9411129
IN3_0.5F-IN1_1.0F	14.870	13.028,191	16.711,809	0,0000223
IN3_1.0F-IN1_1.0F	4.010	2.168,191	5.851,809	0,0031154
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-10.860	-12.701,809	-9.018,191	0,0000864



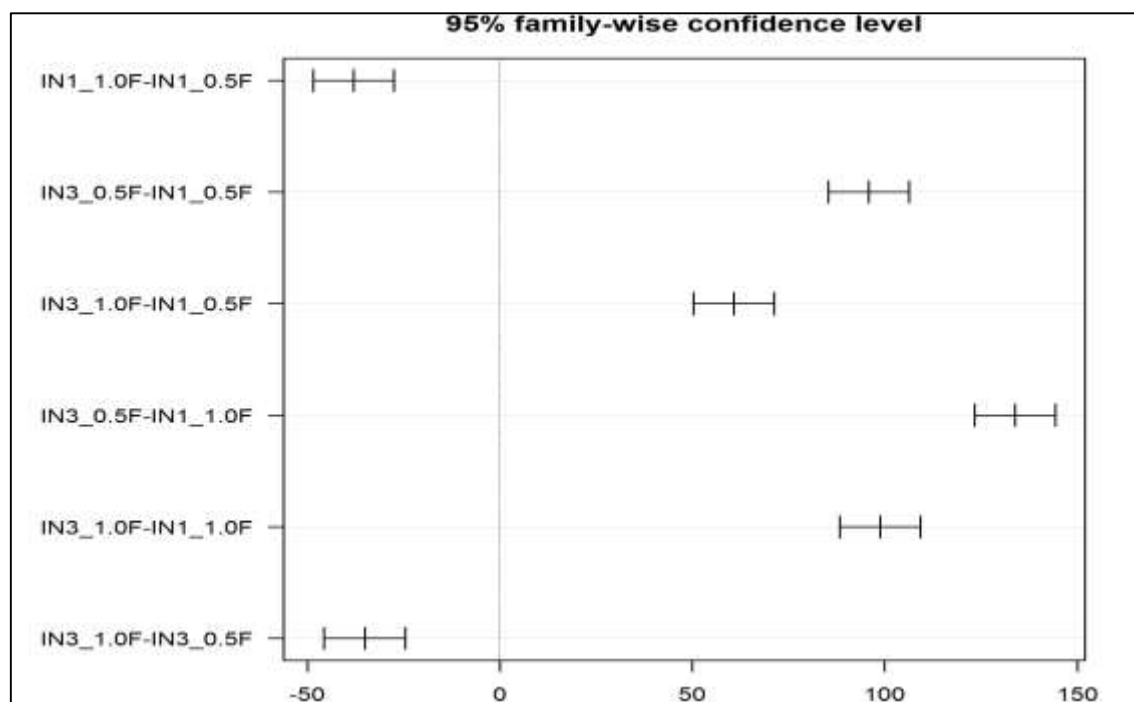
- Sólidos Totais Voláteis

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	-120	-227,486	2.034,863	0,9952448
IN3_0.5F-IN1_0.5F	3.400	1.245,137	5.554,863	0,0103630
IN3_1.0F-IN1_0.5F	-1.500	-365,486	654,863	0,1450444
IN3_0.5F-IN1_1.0F	3.520	1.365,137	5.674,863	0,0091291
IN3_1.0F-IN1_1.0F	-1.380	-3.534,863	774,863	0,1794966
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-4.900	-7.054,863	-2.745,137	0,0026393



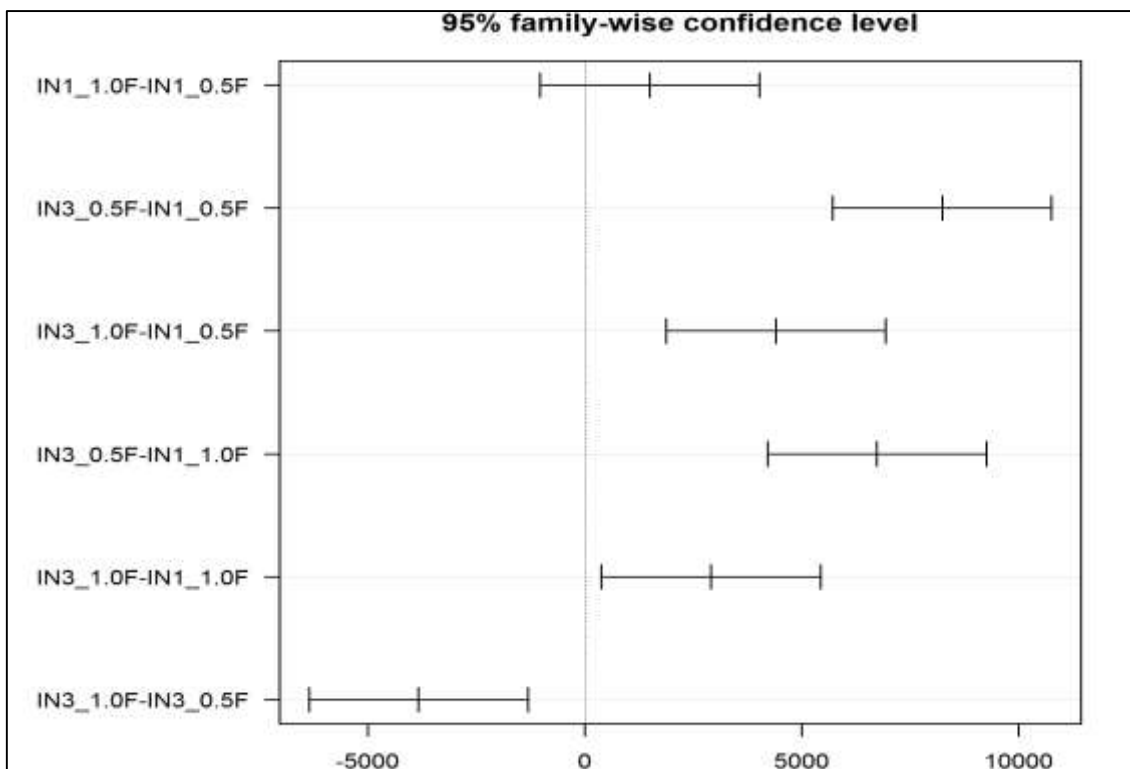
- Fósforo Total

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	-38,02500	48,54471	-27,50529	0,0004325
IN3_0.5F-IN1_0.5F	95,84463	85,32493	106,36434	0,0000100
IN3_1.0F-IN1_0.5F	60,74075	50,22105	71,26046	0,0000922
IN3_0.5F-IN1_1.0F	133,86963	123,34993	144,38934	0,0000003
IN3_1.0F-IN1_1.0F	98,76575	88,24605	109,28546	0,0000079
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-35,10388	-45,62359	-24,58417	0,0005925



- Demanda Química de Oxigênio

Nível	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	p-valor
IN1_1.0F-IN1_0.5F	1.500,000	-1.027,7209	4.027,721	0,2155074
IN3_0.5F-IN1_0.5F	8.240,000	5.712,2791	10.767,721	0,0006499
IN3_1.0F-IN1_0.5F	4.406,667	1.878,9458	6.934,388	0,0071828
IN3_0.5F-IN1_1.0F	6.740,000	4.212,2791	9.267,721	0,0014289
IN3_1.0F-IN1_1.0F	2.906,667	378,9458	5.434,388	0,0315573
IN3_1.0F-IN3_0.5F	-3.833,333	-6.361,0542	-1.305,612	0,0119665



Onde:

IN1\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB da ETE Aracapé (Inóculo 1) e relação A/M de 0,5; IN1\_1,0: Inóculo 1 e relação A/M de 1,0; IN3\_0,5: Meio de Reação preparado com Lodo de Reator UASB de uma indústria de cervejaria (Inóculo 3) e relação A/M de 0,5; IN3\_1,0: Inóculo 3 e relação A/M de 1,0.

O primeiro número após IN representa a diferenciação entre os inóculos, o segundo número após \_ indica a relação alimento/microrganismo (A/M), o I indica se a caracterização foi realizada antes do teste de biodegradabilidade.