

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS EM
BIODIGESTORES TIPO BATELADA SEGUNDO A PORCENTAGEM
DE INÓCULO ADICIONADA UTILIZANDO OS MODELOS DE
REGRESSÃO NÃO-LINEAR DE GOMPERTZ E EXPOENCIAL**

SIMONE DE CASTRO QUEIROZ

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Universidade Estadual
Paulista, Câmpus de Botucatu, para obtenção
do Título de Doutor em Agronomia – Área de
Concentração Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Abril – 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**MODELAGEM DA PRODUÇÃO ACUMULADA DE BIOGÁS EM
BIODIGESTORES TIPO BATELADA SEGUNDO A PORCENTAGEM
DE INÓCULO ADICIONADA UTILIZANDO OS MODELOS DE
REGRESSÃO NÃO-LINEAR DE GOMPERTZ E EXPOENCIAL**

SIMONE DE CASTRO QUEIROZ

Orientador: Prof. Dr. José Raimundo Passos
Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Junior

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Universidade Estadual
Paulista, Câmpus de Botucatu, para obtenção
do Título de Doutor em Agronomia – Área de
Concentração Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Abril – 2003

*Às pessoas que completam minha vida com carinho e amor e que empenharam para a realização de meu ideal: **Sebastião** (In memorian) e **Norma**, meus pais e a meus filhos: **Angelo e Michelle**.*

DEDICO

***“Entrega teu caminho a Iahweh,
confia nele, e ele agirá”.
Salmo 37:5***

AGRADECIMENTOS

- A **DEUS**, o meu muito obrigado por ter me ajudado a vencer minhas dificuldades para concluir esse trabalho que fiz com tanto amor, carinho e dedicação.
- A todos os meus **Irmãos Iluminados** que nos guiam nesta existência.
- Ao **Prof. Dr. José Raimundo de Souza Passos**, pela orientação firme e segura, e amizade a mim dispensada.
- Ao **Prof. Jorge de Lucas Junior**, pelo apoio e dedicação. Também pela assistência e execução do experimento.
- Aos **Professores Jacinta Ludovico Zamboti, Leonardo Sturion, Helenice de Oliveira Florentino Silva e Cezar Lima**, pelas correções como banca examinadora.
- Aos **professores do curso de Energia**, que muito somaram ao meu aprimoramento.
- A **toda minha família**, que sempre me incentivou e apoiou nos momentos difíceis.
- A **minha irmã Mônica**, que sempre me ajudou, desde minha existência.
- A **todos os meus amigos** e companheiros de curso, por todos os anos sempre presentes, pelos sorrisos e convivência harmoniosa.
- A **todos** aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	XIII
RESUMO	1
SUMMARY	3
1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1. Impacto Ambiental dos Resíduos de Bovinos.....	9
2.2. Processos Anaeróbios dentro de Biodigestores	13
2.3. Fatores de Interferência no Processo do Biodigestão Anaeróbia	16
2.4. Tipos de Biodigestores.....	19
2.5. Modelos Matemáticos e Estatísticos no Processo de Biodigestão.....	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Material.....	26
3.2. Abastecimento Inicial dos Biodigestores.....	28
3.2.1. Primeiro Ciclo	29
3.2.2 Segundo Ciclo	30
3.2.3 Terceiro Ciclo	30
3.3. Produção de Biogás	31
3.4. Sólidos Totais e Voláteis	33
3.5. Dados Obtidos.....	34
3.6. Desenvolvimento Metodológico	34

3.6.1. Modelos Utilizados	34
3.6.2. Processo de Estimação.....	36
3.6.3. Propriedade dos Estimadores	37
3.6.4. Testes Estatísticos.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1. Produção de Biogás	39
4.1.1. Produção de Biogás do Primeiro Ciclo	39
4.1.1.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz.....	40
4.1.1.2. Modelagem usando mistura de Exponencial com Gompertz.....	41
4.1.1.2.1. Médias das Repetições dos Tratamentos.....	41
4.1.1.2.2. Repetições dos Tratamentos.....	46
4.1.1.3. Estudo das Propriedades dos Estimadores dos Parâmetros do Modelo	50
4.1.1.4. Testes Estatísticos	54
4.1.1.5. Sólidos Totais e Voláteis	56
4.1.2. Produção de Biogás do Segundo Ciclo	59
4.1.2.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz.....	60
4.1.2.1.1. Médias das Repetições dos Tratamentos.....	60
4.1.2.1.2. Repetições dos Tratamentos.....	62
4.1.2.2. Modelagem Usando Mistura de Exponencial com Gompertz.....	64
4.1.2.2.1. Médias das Repetições dos Tratamentos.....	64
4.1.2.2.2. Repetições dos Tratamentos.....	69
4.1.2.3. Estudo das Propriedades dos Estimadores dos Parâmetros dos Modelos.....	72
4.1.2.4. Testes Estatísticos	76
4.1.2.5. Sólidos Totais e Voláteis	76
4.1.3. Produção de Biogás do Terceiro Ciclo	78
4.1.3.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz.....	79
4.1.3.1.1. Médias das Repetições dos Tratamentos.....	79
4.1.3.1.2. Repetições dos Tratamentos.....	84
4.1.3.2. Estudo das propriedades dos estimadores dos parâmetros	

do modelo	87
4.1.3.3 Testes Estatísticos	89
4.1.3.4 Sólidos Totais e Voláteis	91
4.1.3.5 Curva Mediana e Intervalo de Confiança Empírico	92
5 CONCLUSÕES	95
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Rebanhos brasileiros por estado (1.000 cabeças) – ano 2000.....	11
Tabela 2 – Evolução dos rebanhos brasileiros nos últimos anos (1.000 cabeças).....	12
Tabela 3 – Composição do biogás (BIGERIEGO, 1997).....	16
Tabela 4 – Concentrações ótimas e inibidoras de alguns elementos da formação do gás metano.....	19
Tabela 5 – Componentes de cada substrato e teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), no 1º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.....	29
Tabela 6 – Componentes de cada substrato e teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), no 2º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.....	30
Tabela 7 – Componentes de cada substrato e teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), no 3º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.....	31
Tabela 8 – Valores do total do volume de biogás, em m ³ , durante os 64 e 149 dias da fase de partida, para cada tratamento estudado do primeiro ciclo.....	40
Tabela 9 – Número de observações (n), estimativas dos parâmetros $(\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{g}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2 \text{ e } \hat{g}_2)$, coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 1º ciclo e tratamentos.....	41
Tabela 10 – Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros $(\hat{a}_1, \hat{b}_1, \hat{g}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_2 \text{ e } \hat{g}_2)$, coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 1º ciclo e tratamentos.....	47

Tabela 11 –	Níveis descritivos (p-value) dos testes de normalidade das distribuições amostrais dos estimadores dos parâmetros do modelo, segundo os 4 tratamentos do 1 ^o ciclo.....	51
Tabela 12 –	Comparação entre Betas ₁ , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	54
Tabela 13 –	Comparação entre Gamas ₁ , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	55
Tabela 14 –	Comparação entre Betas ₂ , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	55
Tabela 15 –	Comparação entre Gamas ₂ , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	56
Tabela 16 –	Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %.....	57
Tabela 17 –	Comparação das reduções de sólidos totais, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	57
Tabela 18 –	Comparação das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	58

Tabela 19 –	Valores do total do volume, em m^3 , durante os 84 de produção de biogás, para cada tratamento estudado do segundo ciclo.....	59
Tabela 20 –	Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{d}^2$), no 2º ciclo e tratamento.....	60
Tabela 21 –	Números de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.....	63
Tabela 22 –	Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.....	63
Tabela 23 –	Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.....	64
Tabela 24 –	Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.....	70
Tabela 25 –	Níveis descritivos (p-value) dos testes de normalidade das distribuições amostrais dos estimadores dos parâmetros do modelo, segundo os 3 tratamentos do 2º ciclo.....	72

Tabela 26 –	Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %.....	76
Tabela 27 –	Resultados das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	77
Tabela 28 –	Valores do total do volume, em m^3 , durante os 84 dias da fase de partida, para cada tratamento estudado do terceiro ciclo.....	78
Tabela 29 –	Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 3 ^o ciclo e tratamento.....	79
Tabela 30 –	Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 3 ^o ciclo e tratamento.....	85
Tabela 31 –	Teste de normalidade da distribuição amostral dos estimadores de α_1 , β_1 e γ_1	87
Tabela 32 –	Comparação entre Alfas_1 , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	89
Tabela 33 –	Comparação entre Betas_1 , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	90

Tabela 34 –	Comparação entre Gammas ₁ , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	90
Tabela 35 –	Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %.....	91
Tabela 36 –	Comparação das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).....	92

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1 –	Fases metabólicas e grupos microbianos da digestão anaeróbica (BIGERIEGO, 1997).....	15
Figura 2 –	Vista geral dos biodigestores na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista – UNESP.....	27
Figura 3 –	Vista geral dos biodigestores na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista – UNESP.....	28
Figura 4 –	Vista do gasômetro do biodigestor da área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista -UNESP.....	31
Figura 5 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3) em função do tempo (dias), para os tratamentos do primeiro ciclo. Com médias das repetições dos tratamentos.....	42
Figura 6 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 1 do primeiro ciclo.....	43
Figura 7 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do primeiro ciclo.....	44
Figura 8 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do primeiro ciclo.....	44
Figura 9 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do primeiro ciclo.....	45

Figura 10 –	Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 4 tratamentos do primeiro ciclo.....	46
Figura 11 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 1.....	48
Figura 12 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.....	48
Figura 13 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.....	49
Figura 14 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.....	49
Figura 15 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.....	51
Figura 16 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.....	51
Figura 17 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.....	52
Figura 18 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_2$, por tratamento.....	52
Figura 19 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_2$, por tratamento.....	53
Figura 20 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_2$, por tratamento.....	53
Figura 21 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições do tratamento 4.....	61
Figura 22 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do segundo ciclo.....	62

Figura 23 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.....	63
Figura 24 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições dos dois tratamentos.....	65
Figura 25 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do segundo ciclo.....	66
Figura 26 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do segundo ciclo.....	67
Figura 27 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do primeiro ciclo.....	68
Figura 28 –	Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 3 tratamentos do segundo ciclo.....	69
Figura 29 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.....	71
Figura 30 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.....	71
Figura 31 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.....	73
Figura 32 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.....	73
Figura 33 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.....	74
Figura 34 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_2$, por tratamento.....	74
Figura 35 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_2$, por tratamento.....	75

Figura 36 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_2$, por tratamento.	75
Figura 37 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m ³), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições dos três tratamentos.	80
Figura 38 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do terceiro ciclo.	81
Figura 39 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do terceiro ciclo.	82
Figura 40 –	Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do terceiro ciclo.	83
Figura 41–	Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 3 tratamentos do segundo ciclo.	84
Figura 42 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m ³), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.	86
Figura 43 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m ³), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.	86
Figura 44 –	Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m ³), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.	87
Figura 45 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.	88
Figura 46 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.	88
Figura 47 –	Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.	89
Figura 48 –	Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 2 e 3 do terceiro ciclo.	93

Figura 49 – Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 3 e 4 do terceiro ciclo.....	93
Figura 50 – Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 2 e 4 do terceiro ciclo.....	94

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a modelagem estatística da produção acumulada de biogás utilizando-se de modelos de regressão não linear, a partir do estudo no processo de biodigestão anaeróbia, em 4 tratamentos com três repetições em 12 biodigestores do tipo batelada abastecidos com dejetos bovinos, inóculo e água, em 3 ciclos de fermentação. Conduziu-se um estudo para determinar os efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo na produção de biogás e reduções nos teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV). A partir dos dados de produção diária de biogás e da temperatura do ar, foi feita uma correção no volume de biogás para 1 atm e 20 °C. Com os dados já corrigidos, foram feitas avaliações semanais da produção de biogás ao longo do experimento. Foram obtidos dados relativos as produções diárias de biogás, nos 3 ciclos, apresentados sob forma de totais, em m³ e em valores acumulados para cada tratamento. Assim, foi feita a modelagem estatística, a partir dos tratamentos definidos, utilizando-se dos modelos de Gompertz e Exponencial (regressão não-linear), seguindo duas linhas metodológicas distintas. Inicialmente foram considerados modelos de regressão não-linear somente com um componente determinístico (Gompertz) e posteriormente com dois componentes (mistura de Exponencial com Gompertz). Nas duas linhas metodológicas os ajustes do volume acumulado foram feitos para a média e para as 3 repetições dos tratamentos, em cada ciclo. Os ajustes de uma

Gompertz e mistura de Exponencial com Gompertz dos modelos estatísticos propostos para o volume acumulado de biogás para todos tratamentos dos três ciclos, se mostraram adequadas em todas as situações experimentais. Foram estudadas as propriedades amostrais dos estimadores através de simulações sob ótica distribucional e, devido à não-normalidade dos mesmos, usou-se análise de variância não-paramétrica. O estudo permitiu concluir que a quantidade (porcentagem) adicionada de inóculo teve influência significativa na produção do biogás, contudo, foi observado que a maior porcentagem de inóculo permitiu uma significativa redução no tempo de retenção hidráulica (TRH). Através da curva mediana e intervalo de 95% confiança empírico, no terceiro ciclo, mostrou-se que os três tratamentos diferem entre si.

Palavra-chave: Biodigestores, biogás, anaeróbia, regressão, Gompertz, Exponencial.

MODELING OF THE ACUMMULATED PRODUCTION OF BIOGAS IN BATCH-FED BIODIGESTERS ACCORDING TO THE ADDED INOCULANT PERCENTAGE USING THE GOMPERTZ AND THE EXPONENTIAL MODELS OF NON-LINEAR REGRESSION. Botucatu, 2003. 129p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: SIMONE DE CASTRO QUEIROZ

Adviser: JOSÉ RAIMUNDO DE SOUZA PASSOS

SUMMARY

This study aimed at the statistical modeling of the accumulated biogas production by using non-linear regression models from the study of the anaerobic biodigestion process, in 4 treatments with three repetitions in 12 batch biodigesters fed with bovine faeces, inoculant and water, in 3 fermentation cycles. A study was conducted in order to determine the effects of the manure, water and inoculant amount variation in biogas production and in the reduction of total solids (TS) and total volatile (VS) values. Based on the data relating to the daily production of biogas and air temperature, a correction in the biogas volume to 1 atm and 20°C was made. With the corrected data, weekly evaluations of the biogas production along the experiment were performed. After the corrections in the biogas volume for each treatment in the 3 cycles, we obtained data related to the daily biogas production, which were presented in totals, in m³ and in accumulated values for each treatment. Therefore, the statistical modeling was made from the defined treatments using the Gompertz and the Exponential models of non-linear regression, according to two distinct methodological lines. Firstly we considered a non-linear regression model containing only one determining component (Gompertz), and later the two-component model (a mixture of the Exponential and Gompertz models). In both methodological lines the adjustments of the accumulated volume were made for the average and repetition of treatments in each cycle. The adjustments of one Gompertz, and a mixture of Exponential with Gompertz of the statistical models proposed for the accumulated volume of biogas for all treatments, in the three cycles, was adequate in all experimental situations. The sampling properties of the estimators were studied through

simulations performed under a distribution point of view. This study found out that the added amount (percentage) of inoculant significantly influenced the biogas production. However, a bigger percentage of inoculant allowed for a considerable reduction in the Hydraulic Retention Time (HRT).

Keywords: Biodigesters, biogas, anaerobic, regression, Gompertz, Exponential.

1 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações do governo brasileiro, hoje em dia, é a busca de soluções simples, práticas e econômicas para enfrentar a crise de energia que aflige o país.

No que se refere ao meio rural, tão carente de fontes energéticas necessárias ao incremento da produção, as estatísticas são adversas quanto à eletrificação, pois apenas uma pequena porcentagem das propriedades do Brasil dispõe desse tipo de energia, que é dificultada pelos custos de transmissão.

A crescente crise de combustíveis vem exigindo dos cientistas um esforço cada vez maior para o incremento da produção de energia, através de métodos mais aperfeiçoados, que maximizem a eficiência da utilização das formas renováveis de suprimento de energia, sem degradar o meio ambiente. Assim, a pesquisa se volta cada vez mais para uma busca de fontes alternativas. Entre elas, destaca-se o aproveitamento de resíduos agropastoris.

O Brasil dispõe de condições climáticas favoráveis para explorar a imensa quantidade de energia que pode ser derivada de biomassa como os dejetos animais e restos de cultura, economizando o gás liquefeito de petróleo e combustíveis líquidos (querosene, gasolina, óleo diesel) para o homem urbano, aliviando com isso o país de uma significativa parcela de importação de derivados de petróleo.

Sabe-se que a questão ambiental é complexa, visto ser ela composta por vários fatores do meio físico, biológico e socioeconômico que interagem entre si, podendo ser causa e efeito simultaneamente. Também aspectos políticos e administrativos públicos e privados influenciam muito na questão ambiental.

Muitos estudos têm mostrado que os resíduos sólidos orgânicos, de origem animal e vegetal, constituem-se em fonte geradora de impactos ambientais consideráveis, tais como: a geração de gases e de maus odores, a geração de líquidos percolados (chorume), a atração de animais vetores, assim como também a corrosão de equipamentos e componentes da infraestrutura.

Imediatamente após serem dispostos no meio ambiente, os resíduos orgânicos iniciam sua decomposição, sendo que os fenômenos naturais para sua decomposição ocorrem por ação inicial de microorganismos, cujos processos de seus metabolismos podem ter como resultante água, gás carbônico, metano e energia.

No Brasil o despejo inadequado de resíduos resulta em uma das principais formas de contaminação ambiental, causando propagação de doenças infecciosas. Os resíduos da produção agropastoril contribuem com uma parcela significativa para isso, pois o homem despeja nos rios, a cada ano, milhares de toneladas de solo, agrotóxicos, metais pesados e resíduos orgânicos como camas, carcaças e esterco, dentre outros. Logo, uma solução adequada para amenizar esse impacto ambiental é uma das questões prioritárias com que se defronta atualmente a sociedade.

Segundo Campos (1997), os países em desenvolvimento vêm adotando os Sistemas Intensivos de Produção Animal por meio de grandes confinamentos de bovinos, suínos e aves, decorrente da grande demanda de alimentos notadamente próximo aos grandes centros consumidores, onde a poluição ambiental é grande fator de risco à sobrevivência do homem e dos animais.

O confinamento de bovinos de leite contribui em uma grande parcela para esse impacto ambiental, pois diariamente é produzida uma grande quantidade de dejetos numa área reduzida. A disposição dos resíduos das instalações animais tem se constituído, ultimamente, num problema desafiante para criadores e especialistas, pois envolve aspectos técnicos, sanitários e econômicos (SILVA, 1973). Assim, esses resíduos, se não forem

adequadamente manejados e distribuídos, podem se tornar uma grande carga poluidora do meio ambiente.

Campos (1997) inclui no ambiente em sistemas de confinamento: temperatura, pressão atmosférica, vento, umidade do ar, ruído, radiação térmica, luz, pó em suspensão, densidade animal, calor e umidade gerados pelos animais, concentração de dejetos, de íons, de gases, arquitetura das instalações e outros efeitos.

De toda alimentação ingerida pelos animais, somente uma pequena parte dessa energia é transformada em leite, gordura, carne ou ovos. O restante é descartado para o meio ambiente na forma de fezes, urina e calor.

A quantidade de dejetos produzidos por dia, os teores de umidade, de matéria seca e a composição química variam de acordo com o peso do animal, idade, tipo de alimentação, digestão do alimento, quantidade de água ingerida, estação do ano e outros fatores. O conteúdo do sólido depende do tipo de cama usada, restos de alimentos, águas de limpeza e evaporação (MORSE, 1994).

Para que esses resíduos retornem à natureza sem agredi-la, é necessário a estabilização dos mesmos, isto é, para que um dejetos possa ser decomposto por atividade biológica, é necessário que ele sirva de alimento a algum tipo de organismo.

Entre as alternativas para tratamento de resíduos, nas propriedades rurais, temos em destaque a digestão anaeróbia, processo microbiológico que, em condições anaeróbias, permite transformar a matéria orgânica em biogás: gás natural inflamável, composto principalmente de metano (CH_4) e de dióxido de carbono (CO_2). As bactérias com capacidade de produção de metano são denominadas metanogênicas. Devido à grande porcentagem de metano (50 a 60%) , no processo de digestão anaeróbia, este pode ser utilizado para funcionar motores, geradores, motopicadeiras, refrigeradores de leite, geladeiras, fogões, incubadoras, etc., substituindo o gás liquefeito de petróleo na cozinha, e a energia elétrica consumida em eletrodomésticos (BARRERA, 1993).

As bactérias metanogênicas são caracterizadas por seu crescimento lento e por serem muito sensíveis a uma série de fatores externos que é preciso controlar para que a fermentação se verifique de maneira desejada. Entre esses fatores, podemos destacar os seguintes: temperatura, tempo de retenção hidráulica, pH, tempo de retenção celular, alcalinidade, ácidos graxos voláteis e elementos tóxicos (BIGERIEGO, 1997).

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo a modelagem estatística da produção acumulada de biogás, utilizando-se de modelos de regressão não-linear, no processo de biodigestão anaeróbia, a partir de quatro tratamentos (tratamento 1, 25kg de estrume + 35kg de água; tratamento 2, 22kg de estrume + 26kg de água + 12kg de inóculo; tratamento 3, 20kg de estrume + 22kg de água + 18kg de inóculo; tratamento 4, 18kg de estrume + 18kg de água + 24kg de inóculo) com três repetições em 12 biodigestores do tipo batelada, em três ciclos de fermentação dos dejetos bovinos. O estudo foi conduzido para avaliar os efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo na produção de biogás e reduções nos teores sólidos totais e voláteis.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Impacto Ambiental dos Resíduos de Bovinos

Pela legislação brasileira, considera-se impacto ambiental “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I – a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II – as atividades sociais e econômicas;
- III – a biota;
- IV – as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V – a qualidade dos recursos ambientais” (Resolução CONAMA 001, de 23.01.1986).

Assim, juridicamente, pode-se dizer que conceito de impacto ambiental refere-se exclusivamente aos efeitos da ação humana sobre o meio ambiente. Portanto, fenômenos naturais, como: tempestades, enchentes, incêndios florestais por causa natural, terremotos e outros, apesar de poderem provocar as alterações ressaltadas, não se caracterizam como impacto ambiental.

No Brasil, o primeiro dispositivo legal associado à Avaliação de Impactos Ambientais deu-se por meio da aprovação Lei Federal 6.938, de 31.08.1981. Esta Lei estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente e firma o SISNAMA – Sistema Nacional de Meio Ambiente como órgão executor.

Através da Política Agrícola-Ambiental, ela é planejada e executada dentro da lei, levando em conta a eletrificação rural, e no seu planejamento estão incluídas as atividades agropecuárias, agroindustriais, pesqueiras e florestais (MAIA, 1993).

Sabe-se a complexidade de avaliar a sustentabilidade de sistemas de produção, interagindo entre várias propriedades rurais numa bacia hidrográfica, comunidade rural ou município. Devido ao fato da limitação de avaliação da sustentabilidade dos sistemas de produção, no Brasil, podem ocorrer verdadeiras catástrofes ambientais, pois muitos desses sistemas possuem alta sustentabilidade numa propriedade (EMBRAPA, 2003).

Segundo Souza (2001), os elementos básicos dos processos de modernização da produção já incorporam conceitos de redução da poluição e do impacto ambiental.

Uma das principais causas de extinção de espécies (animais e vegetais) é o avanço da fronteira agrícola, com a exploração desordenada do território brasileiro. Esse processo de extinção vem crescendo significativamente à medida que a população cresce e o índice de pobreza aumenta (IBAMA, 2002).

“A bovinocultura de animais estabulados, confinamentos e leiterias geram diariamente quantidades significativas de resíduos. Assim, da forma que se encontram logo após a sua geração, esses resíduos estão em intensa atividade biológica, o que faz a atração de insetos, a geração de maus odores e líquidos poluentes quando em contato com as águas” (BIOTEC).

Silva (1973) mostra que um dos problemas em confinamentos de leite é a quantidade de dejetos produzidos diariamente, numa área reduzida. A disposição dos resíduos das instalações animais tem se constituído, ultimamente, em dificuldades para criadores e especialistas, pois envolve aspectos técnicos, sanitários e econômicos. Se esses resíduos não forem adequadamente manejados e distribuídos, podem causar prejuízos ao meio ambiente, comprometendo a sobrevivência do homem e dos animais.

Com animais criados no pasto, o manejo dos dejetos de bovinos não chega a ser problema que cause tanto impacto ao meio ambiente; pelo contrário, em muitas situações, pela forma dispersa com que é distribuído até contribui para reposição de parte dos nutrientes minerais que são extraídos pela forrageira que os alimenta. Mas, à medida que os animais são confinados, o volume de dejetos passa ser um sério problema e pode, quando não devidamente manejado, causar dano ao meio ambiente (HARDOIM e LUCAS, 1997).

Pela Tabela 1, a seguir, observa-se uma grande população de rebanhos no Brasil, entre elas a de bovinos, distribuída em todo território nacional.

Tabela 1 – Rebanhos brasileiros por estado (1.000 cabeças) – ano 2000.

Estado	Caprino	Bovino	Ovino	Bubalino
Rondônia	17.583	5.664.320	75.857	12.347
Acre	6.330	1.033.311	45.479	1.604
Amazonas	12.775	843.254	58.220	43.347
Roraima	6.590	480.400	-	100
Pará	69.858	10.271.409	127.405	465.973
Amapá	1.359	82.822	1.323	159.650
Tocantins	20.129	6.142.096	51.857	17.063
Maranhão	332.484	4.093.563	154.384	57.056
Piauí	1.469.994	1.779.456	1.395.960	660
Ceará	789.894	2.205.954	1.606.914	1.135
Rio Grande do Norte	325.031	803.948	389.706	31
Paraíba	526.179	952.779	343.844	85
Pernambuco	1.405.479	1.515.712	753.218	8.035
Alagoas	48.718	778.750	99.326	2.105
Sergipe	11.735	879.730	96.422	0.231
Bahia	383.1974	9.556.752	2.922.701	15.913
Minas Gerais	90.650	19.975.271	116.796	22.124
Espírito Santo	15.482	1.825.283	28.348	554
Rio de Janeiro	27.684	1.959.497	21.100	3.756
São Paulo	70.372	13.091.946	233.681	56.255
Paraná	78.870	9.645.866	548.998	65.064
Santa Catarina	30.229	3.051.104	207.099	17.788
Rio Grande do Sul	72.629	13.601.000	4.812.477	80.440
Mato Grosso do Sul	27.954	22.205.408	378.131	17.445
Mato Grosso	28.396	18.924.532	193.704	23.706
Goiás	25.363	18.399.222	113.683	29.744
Distrito Federal	3.072	112.139	8.325	340
Total	9.346.813	169.875.524	14.784.958	1.102.551

Fonte: IBGE – Pesquisa Pecuária Municipal – 2000

Segundo Moffitt (1999), os dejetos dos animais, logo após o processo de decomposição, atuam como poluentes, pois produzem gases de efeitos prejudiciais, alterando as características do ar no meio ambiente. Mas, por outro lado, mostra que esses dejetos podem ser utilizados como fertilizantes e geração de energia.

A Tabela 2 apresenta uma evolução crescente da população de bovinos ao longo dos anos e, o que causa, uma grande preocupação com os resíduos. Assim, torna-se necessária técnica adequada para estocar, manejar, tratar, utilizar e dispor dos resíduos dentro das unidades de produção, visando à proteção e melhoria da qualidade ambiental, reutilização dos resíduos em outros sistemas agrícolas e maior rentabilidade na produção.

Tabela 2 – Evolução dos rebanhos brasileiros nos últimos anos (1.000 cabeças).

Ano	Caprino	Bovino	Ovino	Bubalino
1990	11.894.587	147.102.314	20.014.505	1.397.097
1991	12.172.146	152.135.505	20.127.945	1.432.112
1992	12.159.564	154.229.303	19.955.874	1.423.348
1993	10.618.531	155.134.073	18.008.283	1.498.890
1994	10.879.286	158.243.229	18.436.098	1.571.349
1995	11.271.653	161.227.938	18.336.432	1.641.950
1996	7.436.454	158.288.540	14.725.503	1.046.106
1997	7.968.199	161.416.157	14.533.716	1.294.507
1998	8.164.153	163.154.357	14.268.387	1.017.246
1999	8.622.935	164.621.038	14.399.960	1.068.059
2000	9.346.813	169.875.524	14.784.958	1.102.551

Fonte: IBGE – Pesquisa Pecuária Municipal – 2000

Conforme Osava (2000), os bovinos produzem uma grande quantidade de metano, causando impacto ambiental de efeito estufa. Uma solução para amenizar tal situação, no Brasil, seria melhorando a atividade pecuária.

Dentro do contexto de implementação de técnicas voltadas à minimização de impactos ambientais e racionalização do uso de energia, merece destaque a utilização de biodigestores no meio rural, os quais se relacionam aos aspectos de saneamento e energia, além de estimularem a reciclagem orgânica e de nutrientes (LUCAS JR. & SILVA, 1998).

Sabe-se que são poucos os produtores que dedicam à pecuária leiteira ou de corte o esterco de bovinos como fertilizantes. Na maior parte dos estabelecimentos, o esterco produzido fica acumulado ao redor dos estábulos ou é lançado diretamente nos mananciais d'água, provocando a sua contaminação com coliformes fecais e a redução do nível de oxigênio da água, comprometendo seriamente o equilíbrio ecológico. Logo, visando ao aproveitamento do potencial fertilizante e à diminuição do potencial poluente do esterco de bovinos, é necessário a escolha de uma forma de manejo dos dejetos que seja adequada ao sistema de exploração de cada estabelecimento agrícola. Uma forma seria a fermentação dos dejetos em esterqueiras líquidas, sólidas ou em biodigestores, como também a utilização do esterco em compostagem. Assim, Barcellos (1991) avaliou o potencial fertilizante do esterco líquido bovino e concluiu que, mesmo não usando esse esterco como única fonte de adubação, aumentou significativamente o rendimento de grãos de milho e matéria seca de aveia, embora não substituindo a adubação mineral recomendada para as culturas.

2.2. Processos Anaeróbios dentro de Biodigestores

Segundo Benincasa et al. (1991), um biodigestor consiste basicamente de um tanque de fermentação anaeróbia (sem a presença do ar) de matérias orgânicas, produzindo um gás combustível composto essencialmente de metano e dióxido de carbono, que basicamente compõem o biogás.

No interior dos biodigestores, sob condições anaeróbicas, há a degradação da matéria orgânica sem a disponibilidade de oxigênio livre, e os microorganismos derivam sua energia para a síntese celular por meio de uma série de reações oxidativas, caracterizando o processo chamado de digestão anaeróbia (CURTIS, 1983; ASAE, 1994).

O processo de digestão que ocorre nos biodigestores compreende a transformação de compostos orgânicos complexos em outras substâncias mais simples que são metabolizadas, resultando em uma mistura de gases que inclui o gás metano (CH_4), o gás carbônico (CO_2), a amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), uma série de compostos reduzidos, além da energia (MAGALHÃES, 1986; ASAE, 1994).

O metano, o principal componente da decomposição anaeróbia de matérias orgânicas, não tem cheiro, nem cor e é de grande valor energético, podendo atingir valores em torno de $12.00 \text{ Kcal.m}^{-3}$ (TCHOBANOGLIOUS, 1979).

Segundo Hardoim (1997), nos processos de digestão anaeróbia pode-se usar resíduos na forma sólida ou na líquida, cujos custos operacionais podem ser minimizados, ou ainda, revertidos em lucro pela utilização de seus subprodutos como o biogás e o biofertilizante.

As vantagens oferecidas pelo processo anaeróbio incluem a redução em quantidade de todo o material acumulado, requerendo disposição final, a conversão sem criação de poluentes do ar, a produção de valiosos subprodutos como o gás metano como fonte de energia e resíduo estável como fonte de fertilizante e condicionador do solo e, por fim, a não necessidade de energia para a movimentação mecânica. Tal técnica tem sido empregada há muitos anos para estabilização de esgotos municipais (MERKEL, 1981).

A determinação dos sólidos é importante para avaliar o “vigor” dos dejetos, o que permite indicar o tratamento necessário e a posterior análise da eficiência desse tratamento. Os sólidos presentes podem ser voláteis ou fixos. Os sólidos voláteis (SV) são representados pela matéria orgânica presente no resíduo, sendo indicativo do vigor, pois são as porções passíveis de transformações. Os sólidos fixos (SF) correspondem à matéria inorgânica (MERKEL, 1981).

O teor de sólidos totais (ST) se refere ao material remanescente após a remoção da água do dejetos por evaporação; corresponde ao total de sólidos fixos (SF) e sólidos voláteis (SV) e ao total de sólidos suspensos e dissolvidos (SOUZA, 2001).

A fermentação anaeróbia é um processo biológico que ocorre devido à ação de bactérias. Assim, quanto maior a população bacteriana, mais eficiente e rápida será a digestão. Para se manter uma boa flora bacteriana, há necessidade de se facultar um ótimo meio de cultura. A disponibilidade de nutrientes é fundamental para o meio de cultura e, conseqüentemente, para obter uma cultura bacteriana em ritmo acelerado de síntese e desenvolvimento (SEIXAS et al, 1980).

O processo de digestão anaeróbia se compõe de múltiplas etapas numa população heterogênea de microorganismos (BIGERIEGO, 1997).

Para melhor entendimento sobre essas etapas, será exposto a seguir, na Figura 1, um esquema da metabolização do carbono. Do início até o final de todo o processo, pode-se resumir em duas fases principais: uma hidrolítica fermentativa e uma segunda, metanogênica.

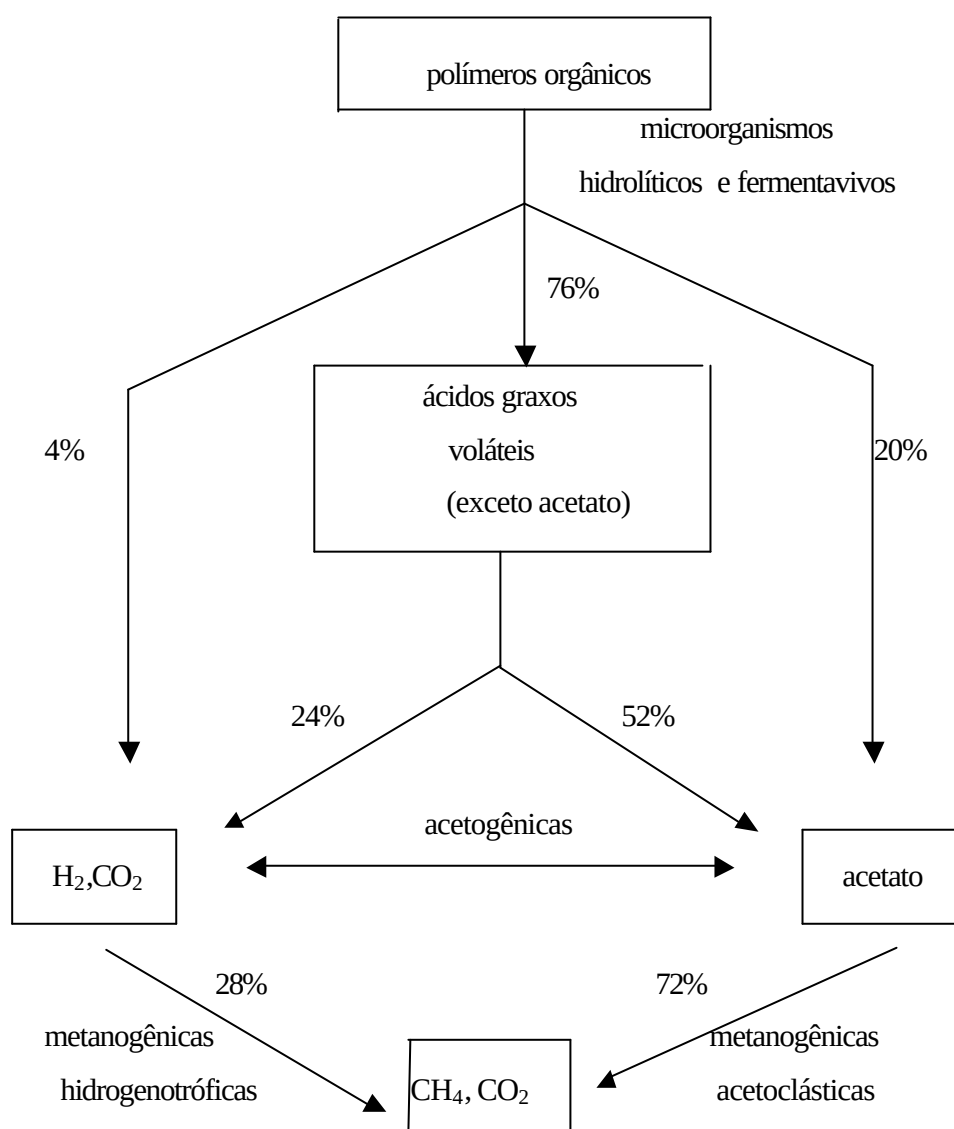


Figura 1 – Fases metabólicas e grupos microbianos da digestão anaeróbica (BIGERIEGO, 1997).

A composição do biogás produzido durante o processo da digestão anaeróbia é uma mistura de gases, e a maior proporção é de metano e de dióxido de carbono. A Tabela 3 representa a composição do biogás.

Tabela 3 – Composição do biogás (BIGERIEGO, 1997).

Gases	Símbolo	Porcentagem
Metano	CH ₄	55 – 80 %
Dióxido de Carbono	CO ₂	45 – 20 %
Hidrogênio	H ₂	0 – 10 %
Oxigênio	O ₂	0,1 – 1 %
Nitrogênio	N ₂	0,5 – 10 %
Monóxido de Carbono	CO	0 – 0,1 %
Gases diversos	SH ₂ , NH ₃ , C _n H _{2n}	1 – 5 %
Vapor de água	H ₂ O	Variável

2.3. Fatores de Interferência no Processo do Biodigestão Anaeróbia.

O processo de biodigestão anaeróbia varia em função de diversos fatores, entre os quais podemos destacar a velocidade de crescimento das bactérias metanogênicas e o tempo de retenção hidráulica, ambos afetados pelo tipo e dimensões do biodigestor, temperatura, pH, tempo de retenção celular, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, elementos tóxicos, etc.

Nogueira (1992) definiu o tempo de retenção hidráulica como o período em que o material orgânico permanece dentro do digestor, isto é, o tempo entre a entrada e saída do digestor. Para o caso de digestores batelada, com carga e descarga única, é dado como o intervalo entre as operações de entrada e saída de material orgânico. Para os biodigestores contínuos, os quais têm constantes cargas e descargas ao longo do processo, o Tempo de Retenção Hidráulica é definido pela equação:

$$TRH = \frac{VD}{VC} \quad (\text{dias})$$

onde: VD é o volume do digestor (m³) e VC é o volume de carga adicionada por dia (m³/dia).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) é o tempo necessário para a mistura ser totalmente digerida no digestor, o que ocorre quando a produção de gás é máxima, definindo melhor qualidade ao biofertilizante. O Tempo de Retenção Hidráulica é determinado pela relação entre o volume do digestor e o volume diário introduzido (volume de carga = água + matéria orgânica) (MAGALHÃES, 1986).

O tempo de retenção celular é o tempo em que as bactérias permanecem no processo do sistema. Geralmente o tempo de retenção celular é igual ao Tempo de Retenção Hidráulica (NOGUEIRA, 1992).

Todos os microorganismos produtores de metano, em especial os metanogênicos, são muito sensíveis à alteração de temperatura; qualquer mudança brusca afeta a produção. Assim é preciso assegurar uma relativa estabilidade de temperatura (TCHOBANOGLIOUS, 1979).

Em função de uma temperatura ótima de crescimento no processo de digestão anaeróbia, os microorganismos se classificam em três faixas de temperatura:

- Psicrofílica, temperatura ótima de crescimento inferior a 30⁰C;
- Mesofílica, ótima de crescimento entre 30 e 45⁰C ;
- Termofílica, temperatura ótima de crescimento superior a 45⁰C, geralmente entre 50 e 65⁰C (BIGERIEGO, 1997).

Segundo Chernicharo (1997), as temperaturas máximas e mínimas definem os limites da faixa em que o crescimento é possível, e a temperatura é dita ótima quando o crescimento é máximo.

De acordo com Lucas Junior (1994), a temperatura do substrato exerce influência sobre a velocidade do processo anaeróbio, atuando diretamente na taxa de crescimento dos microorganismos. Assim também definiu que biodigestores operando na faixa termofílica produzem maior quantidade de biogás e mais rapidamente que na faixa mesofílica,

resultando em menores tempos de retenção, biodigestores com câmaras menores e, conseqüentemente, menores custos. Mas o baixo custo da câmara de fermentação acaba sendo compensado pelos custos de aquecimento.

Segundo Lucas Junior et al (1987), um outro fator que afeta a biodigestão anaeróbia é a fase de partida, que deve ser bem conduzida. A partida é caracterizada como o início do processo de inoculação dos microorganismos no biodigestor, para que estes possam se adaptar ao resíduo em suas condições de vazão e carga orgânica. O aumento gradativo na produção de biogás é um indicativo de que está ocorrendo a adaptação ao substrato. Assim, umas das formas de se iniciar um processo em um biodigestor é com o uso de inóculo, que não só antecipa o pico de produção de biogás, como também aumenta o potencial efetivo da biomassa.

Algumas substâncias podem ser tóxicas às bactérias presentes num processo de digestão anaeróbia, entre elas a amônia, particularmente quando o pH é maior que 7. Estudos mostram também os efeitos prejudiciais de altas concentrações dos ácidos voláteis, principal fonte alimentar das bactérias metanogênicas. Assim, altos teores de ácidos voláteis conduzem a uma inibição do processo de biodigestão. Outras substâncias como sais inorgânicos, sódio; antibióticos, desinfetantes e pesticidas, encontrados em grande escala nas propriedades rurais, também são prejudiciais ao processo (NOGUEIRA, 1986).

Segundo Bigeriego (1997), com um grande aumento de ácidos haverá redução do pH, que inibirá progressivamente as bactérias metanogênicas, podendo bloquear completamente o processo anaeróbio.

Outras substâncias como os metais alcalinos, alcalinos terrosos, sulfitos e solventes orgânicos, como álcoois e ácidos graxos (detergentes) também são prejudiciais (FERRAZ e MARRIEL, 1980).

A Tabela 4 apresenta alguns valores de concentrações ótimas e inibidoras da formação do gás metano, para diversos íons.

Tabela 4 – Concentrações ótimas e inibidoras de alguns elementos da formação do gás metano.

Elementos	dosagem (mg.l ⁻¹)		
	concentração ótima	inibição moderada	inibição forte
Sódio	100 – 200	3500 – 5500	8000
Potássio	200 – 400	2500 – 4500	12000
Cálcio	100 – 200	2500 – 4500	8000
Magnésio	75 – 150	1000 – 1500	3000
Amônia	50 – 1000	1500	8000
Sulfeto	0,1 – 10	100	200
Colbato	20	-	-

Portanto, diferentes metais, o íon amônio e especialmente os metais pesados, apresentam concentrações perigosas ao funcionamento do biodigestor, ou seja, são tóxicos quando atingem uma certa concentração no substrato (BIGERIEGO, 1997).

2.4 . Tipos de Biodigestores

Segundo Benincassa et al. (1991), temos os biodigestores que são alimentados descontinuamente, chamados biodigestores descontínuos ou em batelada, e periodicamente, chamados biodigestores contínuos. Biodigestores em batelada são carregados de uma só vez, mantidos fechados por um período conveniente, sendo a matéria orgânica fermentada descarregada posteriormente. É um sistema bastante simples e de pequena exigência operacional. Sua instalação poderá ser em um tanque anaeróbio ou em uma série de tanques, dependendo das demandas de biogás, da disponibilidade e da qualidade da matéria-prima utilizada. Nos biodigestores contínuos a alimentação é feita periodicamente, geralmente diária, e com manejo do resíduo. Os tipos mais comuns no Brasil são os modelos clássicos da Índia e da China. O processo é dito contínuo porque a cada carga diária, corresponde uma carga de volume semelhante de material fermentado. A biomassa no interior do biodigestor se

movimenta por diferença de carga hidráulica, entre a entrada do substrato e a saída do biofertilizante no momento do carregamento. Cada carga requer um tempo de retenção entre 30 e 50 dias, dependendo da temperatura do meio onde está inserido o biodigestor, se é elevada ou baixa. Por essa razão, biodigestores contínuos são subterrâneos. Do mesmo modo que os biodigestores em batelada, os contínuos podem ter o período de retenção reduzido com a introdução de agitação, aquecimento e adicionamento de inóculos.

2.5 . Modelos Matemáticos e Estatísticos no Processo de Biodigestão

Modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais. Há várias formas e técnicas de se construir modelos matemáticos, uma delas é a modelagem caixa branca. Para esse caso, é necessário conhecer a fundo o sistema a ser modelado como também as relações matemáticas que descrevem os fenômenos. Uma outra técnica é a modelagem caixa preta ou modelagem empírica. Uma das características dessa técnica é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário (AGUIRRE, 2000).

Existe um grande número de sistemas, sejam eles biológicos, físicos, agrônômicos, industriais ou econômicos, que podem ser explicados por modelos matemáticos ou determinísticos. De uma maneira geral, podemos representar um modelo determinístico utilizando uma equação matemática (1). A resposta ou saída é representada por Y . As variáveis ou condições de estado do sistema são representadas por $x_1, x_2, \dots, x_n$, e f representa o “modo” (a forma) que encontramos de “ligar”, ou de conectar a saída com a entrada.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{X}) \quad (1)$$

No entanto, existem outras classes de fenômenos para os quais os modelos determinísticos não são suficientes para que se possa conhecer a saída de um sistema. Surgem assim os chamados modelos estatísticos (2), que são representados por dois componentes: um matemático ou determinístico (funcional) e outro aleatório.

$$Y = f(X; \mathbf{q}) + e \quad (2)$$

O componente determinístico é similar a $f(X)$ de (1), com a diferença que contém em sua estrutura um vetor de parâmetros $\mathbf{q}$, ou seja, $f(X; \theta)$; lê-se: “ $f(X)$ dado θ ”. O componente aleatório, também chamado de erro ou “ruído” é simbolizado por e . Este é responsável pelo carácter aleatório do vetor de resposta (ou das observações) Y , sendo pois associado a um modelo probabilístico como, por exemplo, normal, exponencial, Weibull, gama, binomial, Poisson, dentre outros.

Em muitas situações práticas, o pesquisador observa que o modelo mais apropriado para a situação é linear (3) e (4). No entanto, encontramos muitas situações em que o modelo é não-linear (5). Um modelo é dito “não-linear” se ele é não linear como função dos seus parâmetros. Observe que o modelo (4) tem como forma resultante uma curva. No entanto, o espaço caracterizado por seus parâmetros (espaço paramétrico) é de natureza linear. Modelos que podem ser linearizados por “anamorfose” são denominados de “intrinsecamente não-lineares” (5).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + e_i \quad (3)$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + e_i \quad (4)$$

$$Y_i = \beta_0 (\beta_1)^{X_i} + e_i \quad (5)$$

O vetor de parâmetros $\mathbf{b}$, considerando-se k parâmetros, é da forma:

$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_k]^T$, sendo este uma constante populacional, de valor desconhecido; enquanto os X_i são considerados como constantes pré-fixadas, ou seja, não são variáveis aleatórias.

Os dois modelos (1 e 2), apresentados a seguir, são apenas como exemplos de modelos matemáticos para biodigestores anaeróbios que são formulados através de observações das espécies de bactérias em seus meios, extraindo daí as principais variáveis que influem no seu crescimento ou diminuição. Martinhão (1981) desenvolveu três modelos

matemáticos para analisar quantitativamente as interações entre os componentes: substrato, bactérias e biogás em um biodigestor, utilizando sistemas dinâmicos populacionais. A seguir, representamos um desses modelos que é dado pelo sistema de equações diferenciais que descreve a variação do substrato em um biodigestor, no qual supõe-se que o crescimento das bactérias depende da quantidade de substrato, e o consumo de substrato depende da quantidade de bactérias; nesse modelo o substrato é “variável” no sentido batelada.

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (-a + bs)x \\ \frac{ds}{dt} = -cxs \end{cases} \quad (1)$$

onde a, b, c são constantes positivas, s quantidade de substrato e x quantidade de bactérias, no qual, na ausência de bactérias, o substrato permanece constante e, na ausência de substrato, as bactérias morrem.

Uma análise das soluções desse modelo sem resolver o sistema é dado por:

Como $\frac{ds}{dt} = -cxs$, temos que $\frac{ds}{dt} < 0$, então s é sempre decrescente.

Para $\frac{dx}{dt} = (-a + bs)x$, temos

a) se $-a + bs < 0$,

$$s < \frac{a}{b}, \text{ logo } x \text{ decresce.}$$

b) se $-a + bs > 0$

$$s > \frac{a}{b}, \text{ e assim } x \text{ é crescente.}$$

c) se $-a + bs = 0$

$$s = \frac{a}{b}, \text{ então } \frac{dx}{dt} = 0, \text{ e } x \text{ permanece constante.}$$

Observando o sistema apresentado e as análises das soluções, pode-se afirmar que se trata de um processo relativamente simples, pois relaciona apenas dois componentes. Mas, deve-se lembrar que, em um sistema dinâmico não-linear, na maioria dos casos, não é possível encontrar explicitamente as soluções.

A composição das bactérias que atuam na fermentação do substrato, assim como o processo de formação do biogás, segundo Bassanezi e Ferreira Jr (1988), são extremamente complexos. Desta forma ele propõe modelos que relacionem apenas duas das componentes básicas de um biodigestor: quantidade de bactérias que produzem o biogás e quantidade de biogás produzido que continua no interior do biodigestor.

A relação entre $x(t)$ – quantidade de bactérias que produzem o biogás e $y(t)$ -quantidade de biogás produzido, dependente do tempo, pode ser descrita pelo sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = F(x) - pxy \\ \frac{dy}{dt} = kx \end{cases} \quad \begin{matrix} p \geq 0, & k > 0 & e & x(0) = x_0 \\ & y(0) = 0 \end{matrix} \quad (1)$$

Onde $F(x)$ é a variação da quantidade de bactérias, independentemente da presença do gás, e pxy é o fator de inibição. Supondo que todo biogás é mantido no biodigestor e que, no início da biodigestão, o crescimento das bactérias ainda não está inibido pela própria quantidade de bactérias presentes. Temos $F(x) = ax$, $a > 0$ e, segundo Bassanezi e Ferreira Jr.(1988), a solução desse sistema fornece:

$$y(t) = \frac{y_{**}y_*(1 - e^{-tD})}{y_* - y_{**}e^{-tD}}$$

$$\text{onde } D = \sqrt{a^2 + 2pkx_0} \quad , \quad y_{**} = \frac{a - D}{p} \quad e \quad y_* = \frac{a + D}{p}$$

Esta função tem como assíntotas $y = 0$ e $y = y_*$ e tem ponto de inflexão

$$\left(\frac{\ln \left(\frac{D+a}{D-a} \right)}{p}, \frac{a}{p} \right)$$

Thomas e Nordstedt (1993) apresentam um modelo genérico de digestão anaeróbica para a simulação de vários tipos de reatores e substratos. Três tipos de reatores anaeróbicos foram utilizados: um batelada, um convencional e um contínuo. Tal modelo simulou satisfatoriamente 44 estudos dos três reatores, usando vários substratos diferentes, dentro de 95% de intervalo de confiança.

Segundo Tomeiro (1996), para a inferência estatística do modelo linear ou não, pode-se usar um entre dois enfoques: o paramétrico e o não-paramétrico. No primeiro, é necessário admitir uma dada distribuição de probabilidade para o componente aleatório do modelo, denominado erro; no último, não há necessidade desse conhecimento.

Santos e Lucas Jr. (1997) apresentam estudos realizados com biodigestão anaeróbia de três tipos de cama de frangos após um ciclo de criação e reaproveitados num segundo ciclo, mostrando, pela análise de variância, que os três materiais utilizados diferem entre si para os dois ciclos nas produções de biogás.

Levando em conta que os modelos com poucos parâmetros são melhores para inferência e tornando a equação menos complicada para explicação biológica, Queiroz (2001) desenvolveu um modelo para estudo da biodigestão anaeróbia em biodigestor tipo batelada, utilizando a função Gompertz de regressão não-linear. E, devido à não-normalidade dos estimadores dos parâmetros, a comparação dos parâmetros do modelo de regressão não-linear (α , β , γ) foi feita através de análise de variância não - paramétrica com aplicação do teste de Kruskal-Wallis.

Tornero (1996) apresenta modelagem de grande variedade de curvas de crescimento, aplicada em estudos zootécnicos, utilizando uma função, ou composição de funções diferentes, respeitando as características do experimento, envolvendo as funções logística, Gompertz e exponencial. Assim, os componentes determinísticos apresentados nesse trabalho são:

i) Logística

$$F(t) = \frac{\alpha}{\{1 + \exp[-\gamma(t-d)]\}}, \quad \alpha > 0, \gamma > 0, t \geq 0, d > 0,$$

onde : $F(t)$ a variável resposta, t a variável independente, α e γ parâmetros (α o valor assintótico de $F(t)$ e γ o parâmetro de crescimento) e d a abscissa do ponto de inflexão.

ii) Gompertz

$$F(t) = \exp(\alpha - \beta \gamma^t), \quad \alpha > 0, \beta > 0, 0 < \gamma < 1, t \geq 0$$

onde: α , β e γ são parâmetros, e^α é o valor assintótico de $F(t)$, γ o parâmetro de crescimento e $-\ln(\beta)/\ln(\gamma)$ é a abscissa do ponto de inflexão.

iii) Exponencial

$$F(t) = \exp[\alpha + \gamma(t-t_0)], \quad \alpha > 0, \gamma > 0, t \geq 0,$$

onde: α e γ são parâmetros e t_0 corresponde à mudança de fase na variável t .

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida, no processo de biodigestão anaeróbia, a partir de dados obtidos de biodigestores do tipo batelada do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista- UNESP, cidade cujas coordenadas geográficas são: latitude de 21° 15'22" S, longitude de 48° 18' 58" W.

A região de Jaboticabal possui clima temperado úmido, seco no inverno e com frequência de chuvas no verão, com precipitação média anual de 1.300 mm e temperatura média anual de 21,5 °C, isto é, identificado como Cwa, segundo a classificação pelo método de KOPPEN.

3.1. Material

Levou-se em consideração para a pesquisa os efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo. Foi avaliada a eficiência da digestão anaeróbia na produção de biogás e reduções de teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV).

Foram utilizados no experimento dejetos sólidos de bovinos destinados à produção de leite, obtidos no Sistema de Produção do Departamento de Zootecnia da Universidade Estadual Paulista –UNESP, Campus de Jaboticabal.

Os inóculos utilizados no primeiro abastecimento dos biodigestores foram obtidos de um outro experimento de biodigestão anaeróbia com dejetos de bovinos, no Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP.

Foram utilizados 12 biodigestores do tipo batelada com capacidade de volume de 60kg, com as dimensões: diâmetro interno de 370 mm e altura de 600 mm.

Para maior clareza, ver as Figuras a seguir, nas quais é mostrada a disposição dos biodigestores do experimento.



Figura 2 – Vista geral dos biodigestores na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista – UNESP.



Figura 3 – Vista geral dos biodigestores na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista – UNESP.

3.2. Abastecimento Inicial dos Biodigestores

Adotaram-se três ciclos de abastecimento dos biodigestores, cada um com variação de dias de duração. Em cada ciclo o substrato foi preparado com teor de sólidos totais próximos a 8%, misturando-se estrume de bovinos, água e inóculo, conforme apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7. O inóculo utilizado para o primeiro abastecimento constituiu-se de efluente de biodigestor contínuo modelo indiano operado com cargas diárias constituídas de estrume de bovinos e água. Nos dois ciclos subsequentes utilizou-se o efluente do ciclo anterior.

3.2.1. Primeiro Ciclo

No dia 02/07/2002 iniciou-se o experimento com abastecimento de 12 biodigestores do tipo batelada enumerados de 7 a 18, num total de 4 tratamentos , utilizando esterco fresco de bovinos, cujo teor de sólidos totais, previamente determinado, foi de 19%, e inóculo de biofertilizantes de estrume de bovinos, produzidos em biodigestor da mesma área experimental, cujo teor de sólidos totais, previamente determinado, foi de 5,20%. Tais valores permitiram calcular as seguintes quantidades: tratamento 1 instalado nos biodigestores 7, 8 e 9 com 25 kg de esterco e 35 kg de água para cada biodigestor; tratamento 2 instalado nos biodigestores 10, 11, e 12 com 22 kg de esterco, 12 kg de inóculo e 26 kg de água para cada biodigestor; o tratamento 3 instalado nos biodigestores 13, 14, e 15 com 20 kg de esterco, 18 kg de inóculo e 22 kg de água para cada biodigestor; e por fim o tratamento 4 instalado nos biodigestores 16, 17, e 18 com 18 kg de esterco, 24 kg de inóculo e 18 kg de água para cada biodigestor (Tabela 5). Ao final do abastecimento inicial, realizou-se a agitação do substrato, e todos os gasômetros foram zerados. O tratamento 1 teve tempo de retenção hidráulica (TRH) de 149 dias e os demais tratamentos de 64 dias.

Valores referentes às quantidades de estrume, água, inóculo, porcentagem de teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) de cada tratamento estão apresentados na Tabela 5, a seguir.

Tabela 5 – Componentes de cada substrato e teores de (ST) e voláteis (SV), no 1º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.

Trat	estrume (kg)	água (kg)	inóculo (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)
1	25	35	0	8,12	4,87	7,18	4,31
2	22	26	12	8,48	5,09	7,37	4,42
3	20	22	18	8,68	5,21	7,35	4,41
4	18	18	24	8,75	5,25	7,45	4,47

3.2.2. Segundo Ciclo

Realizado novo abastecimento no dia 6/9/2002 nos tratamentos 2, 3 e 4 da mesma forma anterior, mas com alteração da utilização do próprio inóculo. Foram deixados 20% de inóculo no tratamento 2, 30% no tratamento 3 e 40% no tratamento 4 (Tabela 6). Com tempo de retenção hidráulica (TRH) de 84 dias.

Na Tabela 6, contam-se os valores referentes às quantidades de estrume, água, inóculo, porcentagem de teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) de cada tratamento.

Tabela 6: Componentes de cada substrato e teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), no 2º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.

Trat	estrume (kg)	água (kg)	inóculo (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)
2	22	26	12	8,87	5,322	7,70	4,620
3	20	22	18	8,98	5,386	7,88	4,731
4	18	18	24	8,62	5,169	7,45	4,471

3.2.3. Terceiro Ciclo

Último abastecimento realizado no dia 28/11/2002, nos três tratamentos. Os tratamentos 2, 3 e 4 de forma análoga a do ciclo 2. Com tempo de retenção hidráulica (TRH) para os tratamentos de 77 dias.

Na Tabela 7 estão apresentados os valores referentes às quantidades de estrume, água, inóculo, porcentagem de teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV) de cada tratamento.

Tabela 7: Componentes de cada substrato e teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), no 3º abastecimento com dejetos de bovinos, segundo os tratamentos.

Trat	Estrume (kg)	água (kg)	inóculo (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)
2	22	26	12	7,68	4,610	6,44	3,861
3	20	22	18	7,34	4,404	6,14	3,684
4	18	18	24	7,63	4,579	6,27	3,759

3.3. Produção de Biogás

O volume de biogás era determinado diariamente multiplicando-se a área da secção reta interna dos gasômetros ($0,2827 \text{ m}^2$) pelo deslocamento vertical. O deslocamento vertical era verificado diretamente nas áreas acopladas na parte superior de cada gasômetro, em relação ao ponto zero, pré-fixado no tubo guia de cada gasômetro (Figura 4).

Após as leituras diárias, os gasômetros eram zerados com auxílio do registro de descarga de biogás.



Figura 4 – Vista do gasômetro do biodigestor da área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista -UNESP.

Para toda leitura, o volume de biogás sofreu correção para 20 °C e 1,0 atm de pressão, efetuada como base em trabalho de Caetano (1985), no qual verifica-se que com o fator de compressibilidade (z) o biogás apresenta comportamento termodinâmico próximo do ideal. Para a correção do volume de biogás, utilizou-se a expressão resultante da combinação das leis de Boyle e Gay-Lussac, ou seja:

$$\frac{V_0 P_0}{T_0} = \frac{V_1 P_1}{T_1}$$

na qual,

V_0 = Volume de biogás corrigido, m³;

P_0 = Pressão corrigida do biogás, 10332,72 mm de H₂O;

T_0 = Temperatura corrigida do biogás, 293,15, em K;

V_1 = Volume do biogás no gasômetro;

P_1 = Pressão do biogás no instante da leitura, 9652,10 mm de água;

T_1 = Temperatura do biogás no instante da leitura, K.

Como a pressão atmosférica média em Jaboticabal é igual a 9641,77 mm de H₂O, e a pressão conferida pelos gasômetros é igual a 10,33 mm de H₂O, tem-se como resultado a seguinte expressão para correção do volume de biogás.

$$V_0 = 273,84575 \frac{V_1}{T_1}$$

A temperatura do biogás contido nos gasômetros era verificada no momento de cada leitura de volume de gás, com auxílio de um registrador portátil da marca Brastermo, com sensor de haste metálica que se introduzia em um orifício do gasômetro para este fim.

O potencial de produção do biogás foi calculado utilizando-se os dados de produção diária e as quantidades de estrume “in natura”, de substrato, de sólidos totais e de sólidos voláteis adicionados nos biodigestores, além das quantidades de sólidos voláteis reduzidos durante o processo de biodigestão anaeróbia.

3.4. Sólidos Totais e Voláteis

Para determinação do teor de sólidos, foram obtidas amostras do afluyente no abastecimento e dos efluentes resultantes do processo de fermentação de cada um dos 12 biodigestores em cada ciclo. Cada amostra foi colocada em recipiente de alumínio com tara previamente conhecida e pesada para obtenção do peso úmido (Pu), em balança com resolução de 0,001 g. Depois, foi colocada para secar em estufa com circulação de ar, a temperatura de 65⁰C, até atingir a temperatura ambiente e pesada, na mesma balança, para determinar o peso seco (Ps). O teor de sólidos totais, em percentagem, foi determinado por meio da seguinte equação:

$$ST = (Ps - tara)100 / (Pu - tara)$$

onde:

ST = teor de sólidos totais, %;

Ps = peso seco, g;

Pu = peso úmido, g; e

$tara$ = peso do recipiente de alumínio limpo e seco, g.

O teor de sólidos voláteis do afluyente e dos efluentes, de cada um dos 12 biodigestores em cada ciclo, foi determinado no início e final do experimento, a partir do material seco que serviu para determinação do teor de sólidos totais. Esses materiais eram colocados em cadinhos, com taras previamente conhecidas, e pesados para determinação do peso inicial (Pi), em balança com resolução de 0,001 g. Esses cadinhos eram levados à mufla e mantidos à temperatura de 575 ⁰C por duas horas. Em seguida, eram retirados da mufla, resfriados em dessecador até atingirem a temperatura do ambiente e pesados para determinação do peso final (Pf). O teor de sólidos voláteis (SV) foi determinado por meio da seguinte equação:

$$SV = ST - [(Pi - Pf)100 / Pi]$$

onde:

SV = teor de sólidos voláteis, %;

P_i = peso inicial, g; e

P_f = peso final, g.

3.5. Dados Obtidos

Para cada ciclo, foram obtidos dados relativos às produções de biogás, apresentados sob forma de totais, em m^3 , acumulada para cada tratamento.

3.6. Desenvolvimento Metodológico

Para a análise estatística utilizou-se delineamento experimental inteiramente casualizado. Foram analisadas a produção de biogás e a redução de sólidos totais e voláteis.

3.6.1. Modelos Utilizados

Os processos desenvolvidos neste trabalho permitem modelação de grande variedade de curvas de crescimento, quer utilizando adição de uma mesma função, ou composição de funções diferentes, respeitando as características do experimento.

O modelo para estudo da produção de biogás, para cada tratamento anteriormente mencionados, foi o Gompertz (RATKOSWSKY, 1983), como se segue:

$$Y_{ij} = \exp(a - bg^{x_{ij}}) + e_{ij}$$

onde Y_{ij} é o volume acumulado (m^3) do i -ésimo dia e submetido ao tratamento j ; x_{ij} é o tempo (dias); $\theta_1 = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T$ é o vetor de parâmetros, cujos componentes são: α = parâmetro

relacionado à assíntota, ou estabilização do processo; b e g são relacionados à forma; e_{ij} é o componente aleatório (ruído). Os índices i e j são, respectivamente, relativos à i -ésima observação (dia) e ao j -ésimo tratamento. Esse modelo possui, no seu componente determinístico, ponto de inflexão (valor do ponto ou velocidade instantânea máxima) assimétrico, cujo valor pode ser obtido pela expressão $\frac{-\ln(\beta)}{\ln(\gamma)}$. As estimativas dos parâmetros foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados. A expressão que fornece a velocidade instantânea de crescimento do componente determinístico $f(X)$ é função dos parâmetros α , β , γ , ou seja:

$$\frac{df(x)}{dx} = -bg^x \ln(g) \exp(a - bg^x)$$

Para que os k tratamentos tenham a mesma velocidade instantânea, é necessário que:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \alpha_2 = \dots = \alpha_k & e \\ \beta_1 &= \beta_2 = \dots = \beta_k & e \\ \gamma_1 &= \gamma_2 = \dots = \gamma_k\end{aligned}$$

Também foi utilizada a mistura de modelos de regressão não-linear, isto é, composição de Exponencial (base γ) com Gompertz, para estimar a produção de biogás dentro de cada tipo de tratamento em cada ciclo,

$$Y_{ij} = (a_1 - b_1 g_1^x) - (\exp(a_2 - b_2 g_2^x)) + e_{ij}$$

onde Y_{ij} é o volume acumulado (m^3); x_{ij} é o tempo (dias); $\theta_2 = [\alpha_1 \ \beta_1 \ \gamma_1 \ \alpha_2 \ \beta_2 \ \gamma_2]^T$ é o vetor de parâmetros, e_{ij} é o componente aleatório (ruído). Os índices i e j são, respectivamente, relativos à i -ésima observação e ao j -ésimo tratamento. A expressão que fornece a velocidade

instantânea de crescimento do componente determinístico $f(X)$ é função dos parâmetros $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \alpha_2, \beta_2$ e γ_2 , ou seja:

$$\frac{df(x)}{dx} = b_2 g_2^x \ln(g_2) \exp(a_2 - b_2 g_2^x) - b_1 g_1^x \ln(g_1)$$

Para que os k tratamentos tenham a mesma velocidade instantânea, é necessário que:

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \dots = \alpha_{kk} \quad \text{e}$$

$$\beta_{11} = \beta_{22} = \dots = \beta_{kk} \quad \text{e}$$

$$\gamma_{11} = \gamma_{22} = \dots = \gamma_{kk}$$

Não foi utilizado o modelo com mistura com mais de duas funções, por trazer dificuldades para a inferência estatística e, segundo Ratkowsky (1983), modelos com muitos parâmetros dificultam a convergência.

3.6.2. Processo de Estimação

Para o processo de estimação foi utilizado o método iterativo de Gauss-Newton modificado por Marquardt. Através deste procedimento, cada iteração minimiza a soma dos quadrados dos desvios dos valores observados em relação à função esperada linearizada.

Também foram feitas várias tentativas de valores iniciais para o ajuste que se mostrava fora da realidade biológica ou não convergia, sempre levando em consideração que qualquer processo iterativo depende muito dos valores iniciais atribuídos aos parâmetros a estimar. E a qualidade da convergência depende não só da expressão da função esperada, mas também dos valores iniciais (TORNERO, 1996).

Para a estimação dos valores iniciais foram utilizadas a regressão linear através do método dos mínimos quadrados e análise da função esperada com respeito aos parâmetros. Assim obteve-se saída das estimativas e soma dos quadrados dos resíduos a cada passo, possibilitando verificação do padrão da convergência (oscilante ou convergindo rapidamente no início e suavemente depois, ou não-convergência), número de iterações, estimativas finais, erros padrões dos estimadores, gráfico superpondo valores resposta observados e ajustados pelo modelo.

Uma vantagem do modelo não-linear é que geralmente seus parâmetros têm significado biológico. Este fato foi utilizado para conferir a adequação dos valores iniciais, isto é, analisando o significado agrotécnico desses parâmetros, pôde-se eliminar propostas de valor inicial. Também a visualização gráfica da função esperada contribuiu para escolha dos valores iniciais.

O ajustamento do modelo foi feito para o volume acumulado de biogás de duas maneiras: médias dos tratamentos e com todas as repetições dos tratamentos, dentro de cada ciclo.

O programa utilizado para o ajuste dos dados foi o SAS – “Statistical Analysis System” (SAS,1991), no qual utilizaram-se os seguintes módulos: Base, Stat, Iml e Insight (apêndice).

3.6.3. Propriedade dos Estimadores

Para analisar as conseqüências da não-linearidade sobre inferências dos parâmetros da curva de crescimento, foi necessário estudar o comportamento da distribuição amostral dos estimadores de mínimos quadrados dos modelos não-lineares em relação à distribuição normal. Assim, foram gerados 1000 valores no processo de simulação de Monte Carlo, necessárias para obtenção dos gráficos e, em seguida, esses dados foram agrupados em intervalos de classe para construção dos histogramas para cada parâmetro estimado.

3.6.4. Testes Estatísticos

Após o estudo do comportamento da distribuição amostral dos estimadores, verificou-se a não-normalidade dos estimadores e usou-se a análise de variância não-paramétrica.

Para comparação dos parâmetros do modelo de regressão não-linear (α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 e γ_2), referentes a cada um dos tratamentos, no primeiro e terceiro ciclo, foi feita análise de variância não-paramétrica (teste de Kruskal-Wallis). Nos casos em que houve diferença significativa por esse teste, foi aplicado o teste de comparação múltipla de Student-Newman-Keuls (SNK), a 5% de significância. Para todos os tratamentos, no segundo ciclo, foi feita análise de variância não-paramétrica com aplicação do teste de Mann-Whitney, a 5% de significância.

Também, foi feita análise de variância não-paramétrica para comparação das reduções de sólidos totais e voláteis, referentes a cada um dos tratamentos, em cada ciclo, com aplicação do teste de Student-Newman-Keuls (SNK), a 5% de significância.

Para a análise de variância (ANAVA) foi utilizado o programa SIGMA STAT.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos em função da metodologia adotada serão apresentados em Tabelas e Figuras, de acordo com os itens a seguir.

4.1. Produção de Biogás

4.1.1. Produção de Biogás do Primeiro Ciclo

O primeiro ciclo durou 149 dias (de 02/07/2002 a 28/11/2002) para o tratamento 1 e 64 dias (de 02/07/2002 a 04/09/2002) para os tratamentos 2, 3 e 4. Como no 64^o dia, os biodigestores do tratamento 2, 3 e 4 mantinham a produção acumulada muito baixa, optou-se por encerrar o ciclo de produção de biogás e determinar a produção acumulada aos 64 dias, bem como analisar os tempos gastos pelos biodigestores para atingir essa produção. Com o mesmo procedimento anterior, optou-se por encerrar o ciclo de produção e determinar a produção acumulada do tratamento 1 aos 149 dias.

Os valores do total do volume de biogás, em m³, durante os 64 e 149 dias para cada tratamento estudado do primeiro ciclo, estão apresentados na Tabela 8.

Como pode ser visto na Tabela 8, o volume total médio mínimo durante os 64 e 149 dias foi de 0,10921 m³, observado no tratamento 2 . Também observa-se

que a produção total do volume de biogás, em m^3 , do tratamento 4 foi próximo do tratamento 1. Isso mostra que o tratamento 4, com aproximadamente metade do tempo de retenção hidráulica (TRH) em relação ao tratamento 1, foi melhor. Isso se deve ao fato de que, para maiores quantidades de inóculo (24 kg), as produções de biogás são praticamente as mesmas, com tempo de retenção hidráulica (TRH) bem menor.

Os tratamentos 2 e 3 não obtiveram bons resultados, devido a quantidade de inóculo utilizada. Também, deve-se levar em conta, para toda a produção do biogás do primeiro ciclo, a época do ano, pois temperatura mais baixa produz inibição das bactérias metanogênicas, interferindo no total do volume de biogás acumulado de cada tratamento.

Tabela 8 – Valores do total do volume de biogás, em m^3 , durante os 64 e 149 dias da fase de partida, para cada tratamento estudado do primeiro ciclo.

Tratamento	biodigestor	dias	Volume Acumulado (m^3)	Média
1	7	149	1,38369	1,31442
1	8	149	1,12315	
1	9	149	1,43661	
2	10	64	0,09226	0,10921
2	11	64	0,12149	
2	12	64	0,11377	
3	13	64	0,17195	0,15207
3	14	64	0,14266	
3	15	64	0,14283	
4	16	64	1,35098	1,29289
4	17	64	1,19169	
4	18	64	1,33081	

4.1.1.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz

Para o primeiro ciclo não foi utilizada essa modelagem em nenhum dos quatro tratamentos, devido à dificuldade de estimar os parâmetros.

4.1.1.2. Modelagem Usando Mistura de Exponencial com Gompertz

4.1.1.2.1. Médias das Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 9, encontram-se algumas características da qualidade do ajuste de mistura de Exponencial com Gompertz, com a média das repetições dos tratamentos, através das estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

Tabela 9 – Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{\sigma}^2$), no 1º ciclo e tratamentos.

Ciclo	Trat	n	$\hat{a}_1$	$\hat{b}_1$	$\hat{g}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{b}_2$	$\hat{g}_2$	R^2 (%)	$\hat{\sigma}^2$
1	1	147	5,409	4,140	1,000	0,219	0,001	1,061	99,30	0,0014
1	2	63	20,494	3,677	0,936	3,015	0,193	0,923	99,81	8,446E-7
1	3	63	1,026	0,729	1,000	-0,143	1,100	0,919	99,86	1,314E-6
1	4	63	4,125	2,831	0,936	0,338	0,113	1,057	99,87	0,00024

Observa-se pela Tabela 9 que as estimativas dos parâmetros não são muito próximas, isto é, existem diferenças entre os tratamentos, logo as velocidades de crescimento são diferentes. Notou-se que o coeficiente de determinação R^2 é bem alto, indicando um bom ajuste, mas deve-se levar em conta que somente essa medida não é de bom auxílio na discriminação dos modelos. Observou-se que as variâncias residuais, por serem baixas, caracterizaram a eficiência do modelo.

Na Figura 5, estão apresentados o modelo ajustado para o volume acumulado, no tempo em dias, com médias das repetições dos quatro tratamentos. O ajuste do modelo para o volume acumulado de biogás foi bom e as oscilações entre os volumes acumulado observado e ajustado foram inerentes a processos biológicos, isto é, ocorreu

superestimação, mas irrelevante. Observa-se no tratamento 1 que os últimos dias não estão bem ajustados pelo modelo, fato que também ocorreu no modelo Gompertz (sem mistura). Um ajuste do tratamento 1 com mistura de mais de duas funções poderia dar melhor visualização gráfica do ajuste, mas a quantidade de parâmetros acarretaria dificuldades para a inferência estatística, como também a não convergência no processo de estimação.

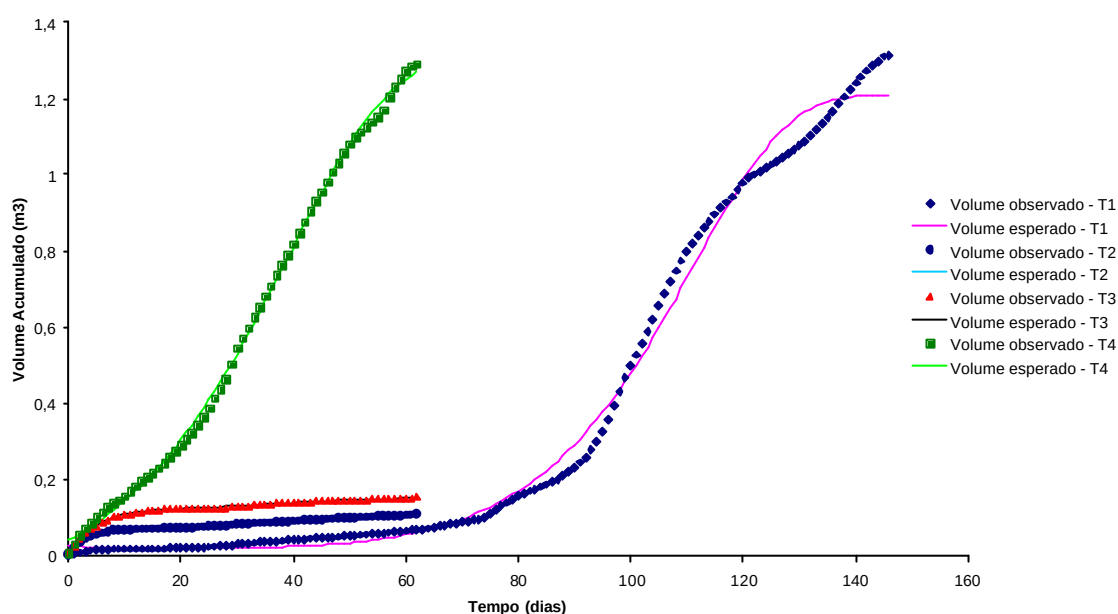


Figura 5 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3) em função do tempo (dias), para os tratamentos do primeiro ciclo. Com médias das repetições dos tratamentos.

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9, estão apresentadas as curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás ao longo do tempo em dias para cada tratamento do primeiro ciclo.

Observa-se na Figura 6 que a velocidade de produção do biogás foi crescente aproximadamente até ao 111^o dia e a partir desse dia, foi decrescente. Interessante notar, que esse comportamento é esperado, pois estamos com um tratamento sem adicionamento de inóculo, logo as bactérias metanogênicas demoram mais na produção do

biogás. Mesmo assim, mostrou-se um bom resultado da produção do biogás ao longo do processo.

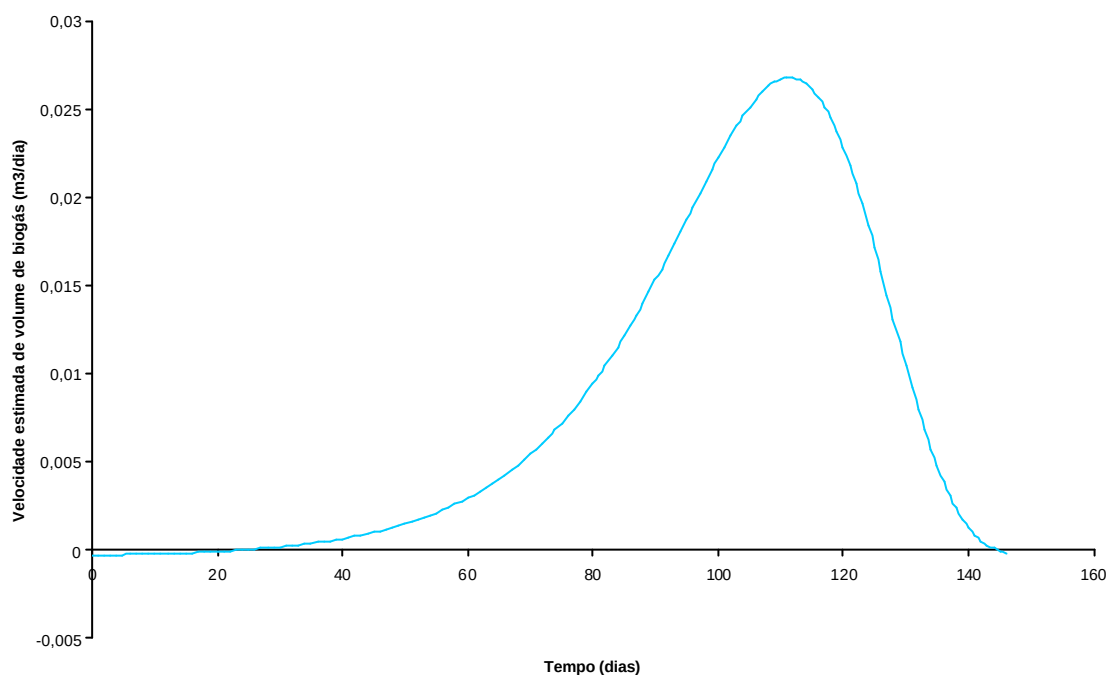


Figura 6 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 1 do primeiro ciclo.

Observa-se nas Figuras 7 e 8 que a velocidade de produção do biogás do tratamento 2, foi decrescente no início do ciclo, com uma velocidade crescente baixa ao longo do tempo, mostrando que, no que se relaciona à produção de biogás, não se obteve bom resultado.

Verifica-se que ocorreu fato semelhante nos tratamentos 2 e 3, mostrando que ambos os tratamentos reagiram muito pouco com a quantidade de inóculo adicionada (Figuras 7 e 8).

Através da curva de velocidade instantânea de produção do biogás, Figura 8, mostrou-se que essa produção do biogás também não obteve bom resultado.

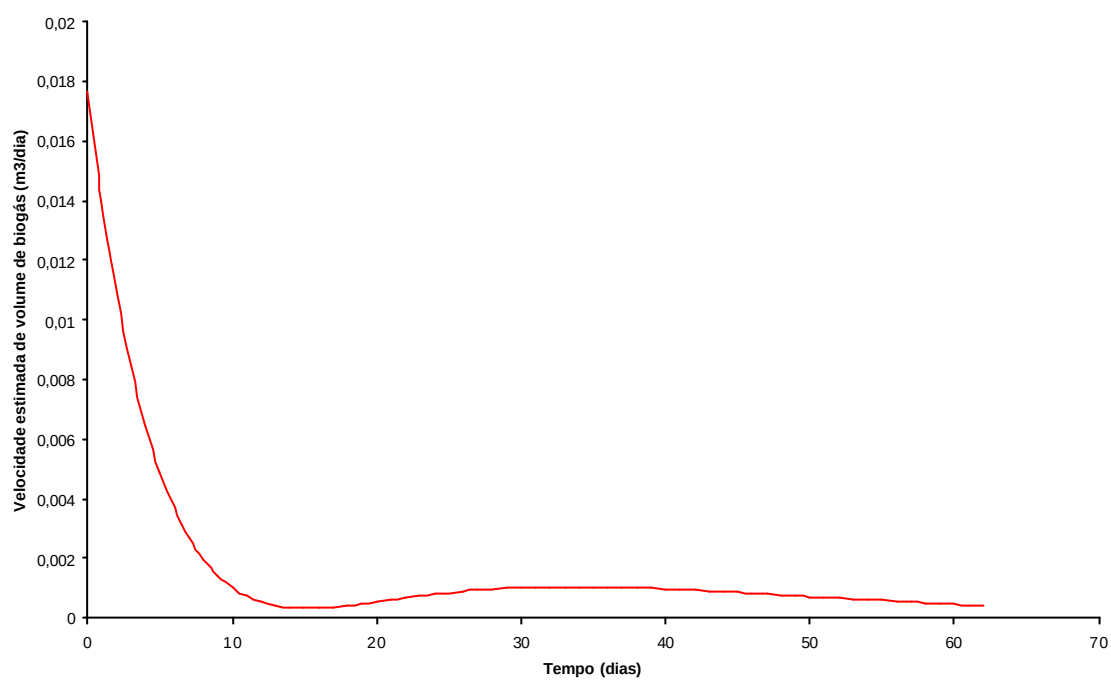


Figura 7 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do primeiro ciclo.

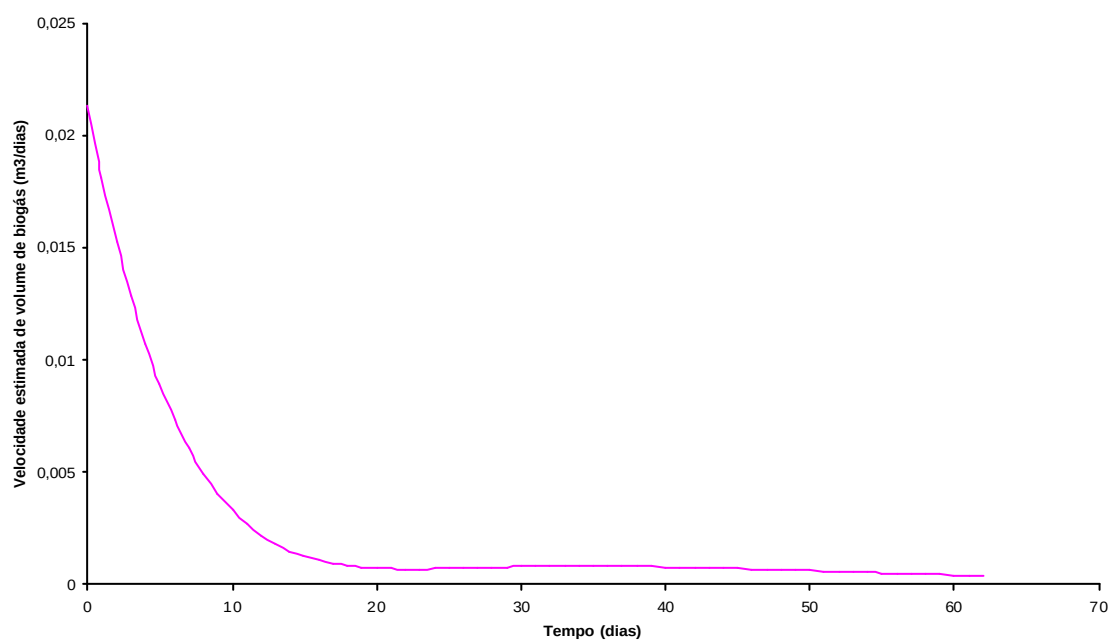


Figura 8 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do primeiro ciclo.

Observando-se a Figura 9, verificou-se que a velocidade de produção do biogás do tratamento 4 foi crescente, ao longo do tempo em dias, até aproximadamente ao 40^o dia e após esse dia, decrescente. Evidenciando que essa produção do biogás obteve bom resultado 1.

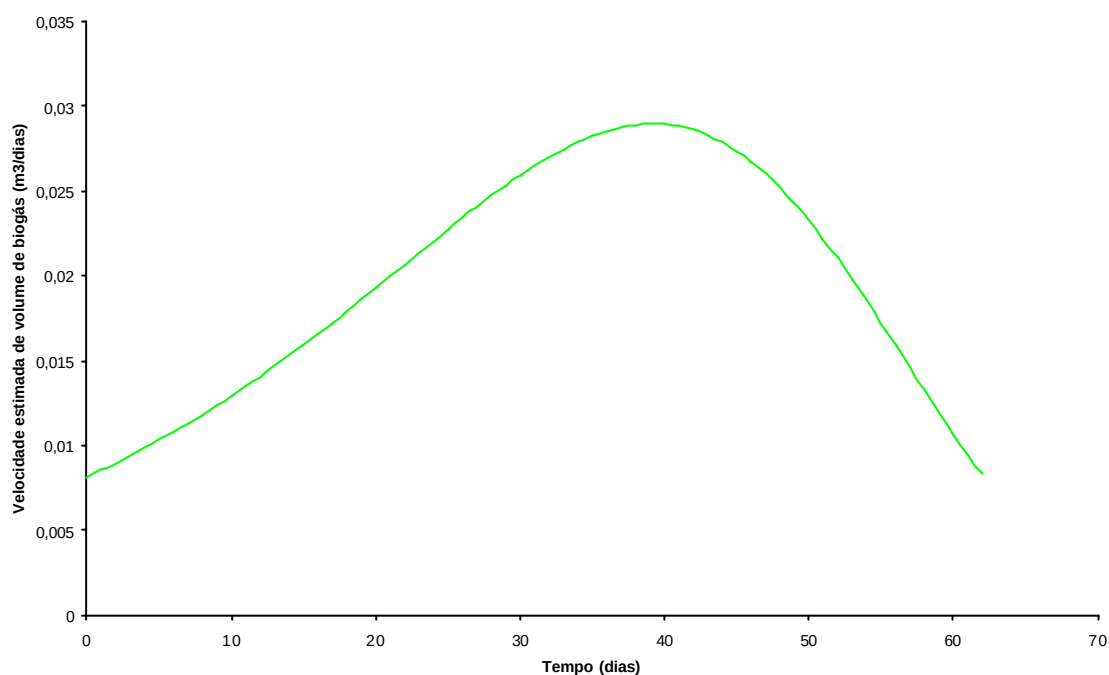


Figura 9 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do primeiro ciclo.

Ao comparar as curvas de velocidades instantâneas, Figura 10, observou-se que o tratamento 4 tem uma velocidade muito maior de produção do biogás, devido a quantidade de inóculo adicionada ao tratamento (24kg), que antecipa o pico de produção de biogás. O tratamento 4 permitiu, pelo aumento da velocidade de degradação, a antecipação do biogás, indicando que os biodigestores poderiam ser desocupados na metade do tempo em relação ao tratamento 1, permitindo novo ciclo de produção de biogás.

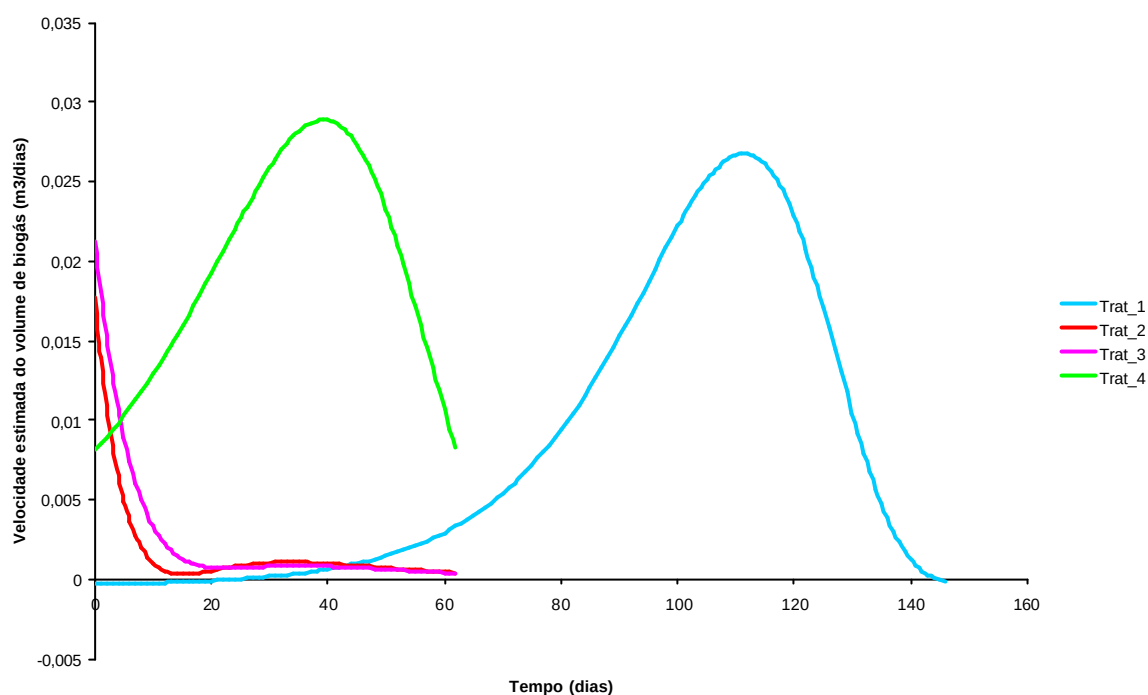


Figura 10 – Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 4 tratamentos do primeiro ciclo.

4.1.1.2.2. Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 10, encontram-se algumas características da qualidade do ajuste de mistura de Exponencial com Gompertz para as repetições dos tratamentos, como: das estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), o coeficiente de determinação (R^2 (%)) e a variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

Tabela 10 – Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 1º ciclo e tratamentos.

Ciclo	Trat	Rep	n	$\hat{a}_1$	$\hat{b}_1$	$\hat{g}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{b}_2$	$\hat{g}_2$	R^2 (%)	$\hat{s}^2$
1	1	1	147	20,573	19,090	1,000	0,376	0,005	1,051	99,27	0,00176
1	1	2	147	7,386	6,442	1,000	-0,069	0,000	1,099	99,22	0,00114
1	1	3	147	6,688	5,273	1,000	0,326	0,001	1,062	99,88	0,00270
1	2	1	63	18,653	3,244	0,918	2,921	0,186	0,914	99,70	0,0774
1	2	2	63	14,056	2,807	0,921	2,634	0,214	0,915	99,94	0,0953
1	3	3	63	25,337	4,738	0,938	3,227	0,202	0,934	99,48	2,302E-6
1	3	1	63	2,309	1,277	0,942	0,753	0,730	0,931	99,88	1,485E-6
1	3	2	63	0,819	0,602	0,934	-0,398	1,166	0,918	99,88	1,004E-6
1	3	3	63	0,559	0,482	0,933	-0,889	1,782	0,903	99,75	2,002E-6
1	4	1	63	18,115	17,026	0,999	0,143	0,090	0,090	99,93	0,000134
1	4	2	63	17,087	15,338	1,000	0,660	0,132	1,050	99,63	0,000551
1	4	3	63	8,910	7,687	0,999	0,297	0,126	1,057	99,89	0,000211

A tabela 10 mostra algumas características da qualidade do ajuste. Da mesma maneira, mostra que o coeficiente de determinação R^2 é bem alto, novamente indicando um bom ajuste. Nota-se que as variâncias residuais baixas caracterizaram a eficiência do modelo.

Nas Figuras a seguir, estão apresentados os ajustes do modelo para o volume acumulado, no tempo em dias, nas três repetições dos quatro tratamentos. Indicando que o ajuste do modelo foi adequado em todas situações. O ajuste do tratamento 1 foi pior que os demais tratamentos, mas mesmo assim o modelo foi adequado.

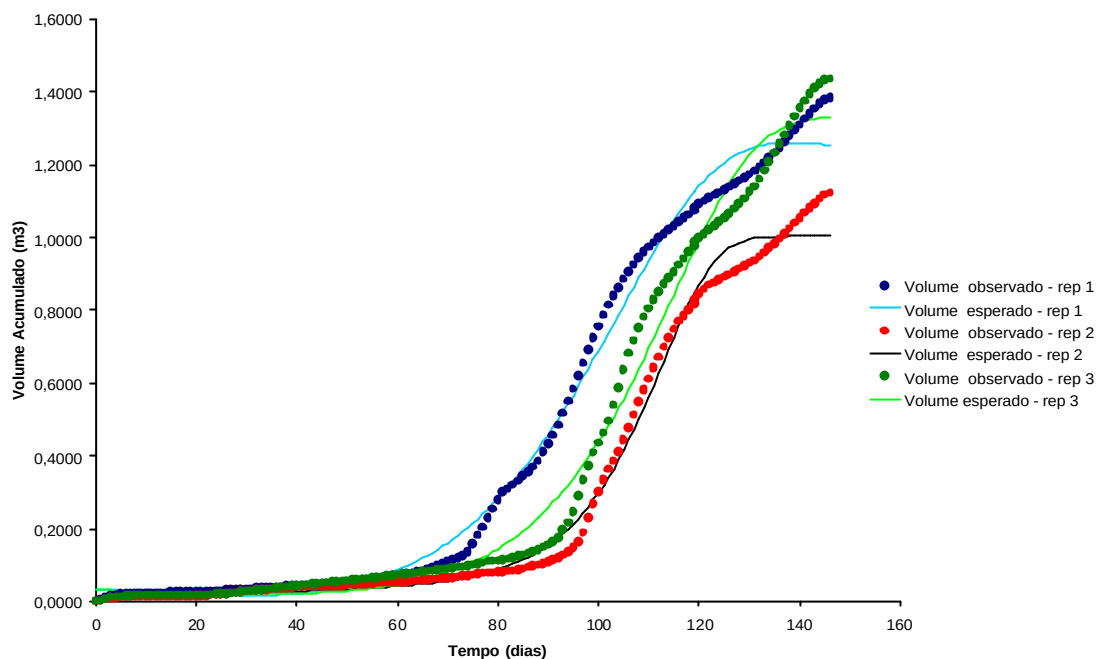


Figura 11 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 1.

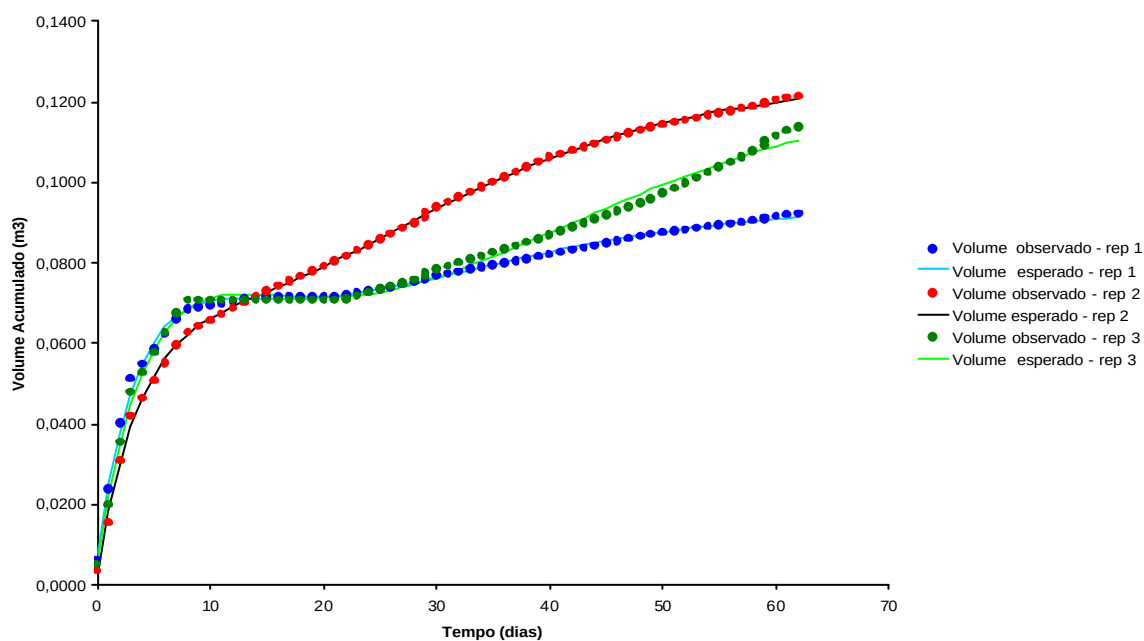


Figura 12 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.

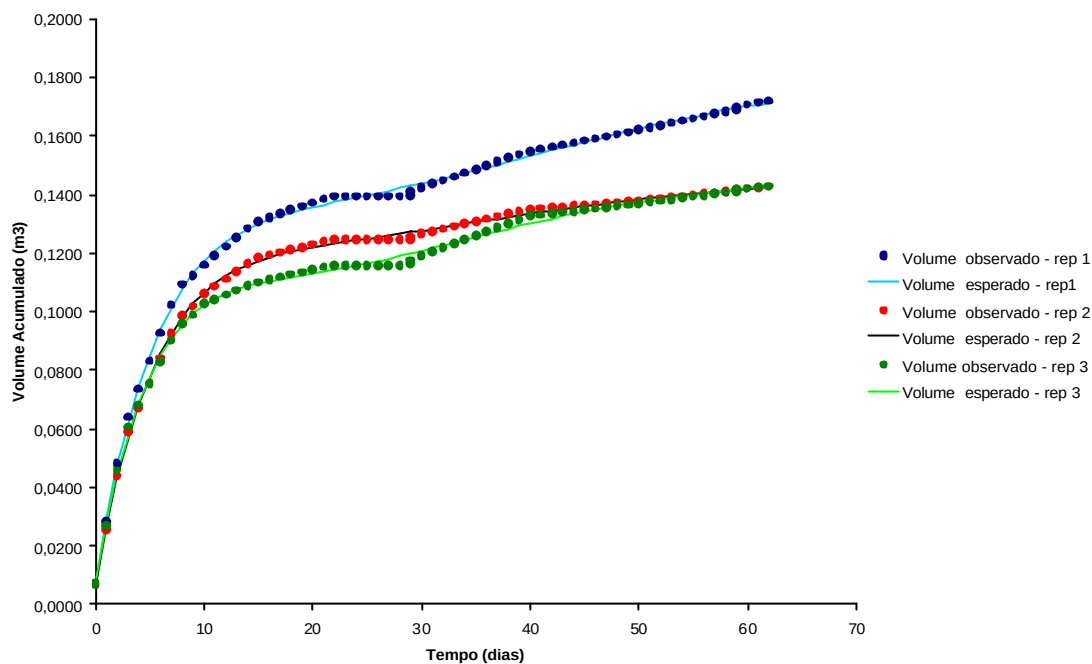


Figura 13 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m³), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.

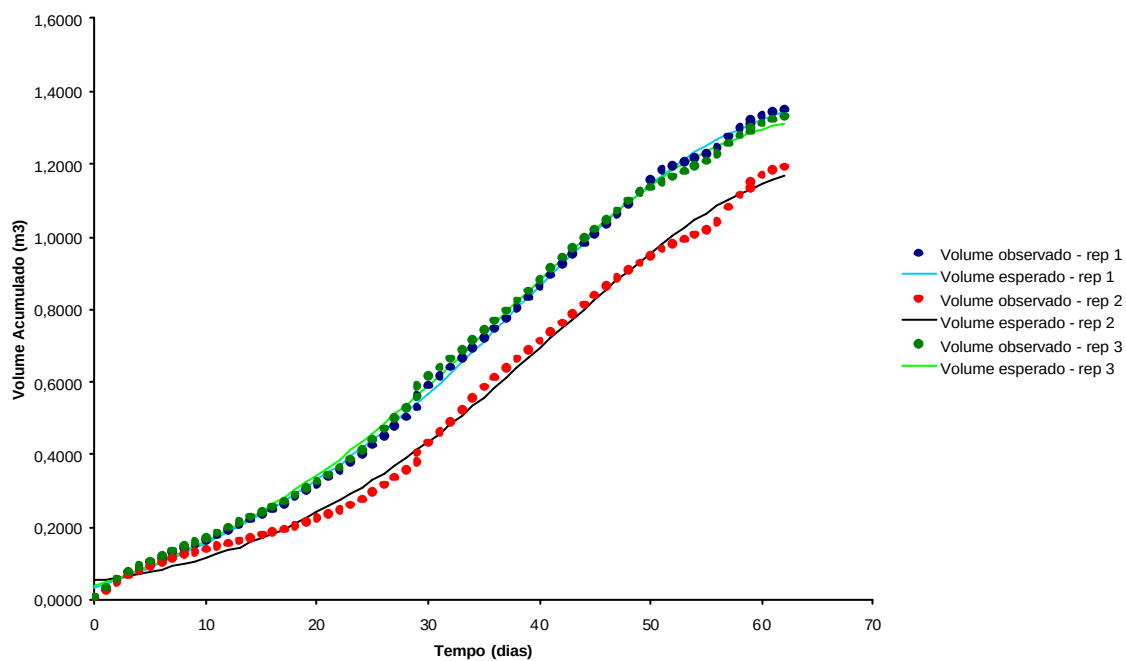


Figura 14 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m³), em função do tempo (dias), para o primeiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.

4.1.1.3. Estudo das Propriedades dos Estimadores dos Parâmetros do Modelo

A Tabela, a seguir, mostra o teste de normalidade da distribuição amostral dos estimadores de α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 e γ_2 do modelo com mistura de Exponencial com Gompertz, segundo os quatro tratamentos.

Tabela 11 – Níveis descritivos (p-value) dos testes de normalidade das distribuições amostrais dos estimadores dos parâmetros do modelo, segundo os 4 tratamentos do 1^o ciclo.

Ciclo	Trat	Distribuição Amostral					
		$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\gamma}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\gamma}_2$
1	1	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
1	2	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
1	3	<0,0001	<0,0001	0,3207	<0,0001	<0,0001	<0,0001
1	4	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

Pelo teste, se o nível descritivo for menor que 0,05 os dados não seguem uma distribuição normal. Observou-se que a maioria dos valores é menor que 0,001. Assim, pela idéia de Ratkowsky (1983) foi reparametrizada a equação, colocando exponencial em α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 , e γ_2 . Mesmo assim não ocorreu a normalidade da distribuição amostral, mostrando que não é assimétrica. Logo, não foi aceita a reparametrização e usou-se a análise de variância não-paramétrica para todo o estudo do modelo com mistura de Exponencial com Gompertz no primeiro ciclo.

O estimador γ_1 de todos tratamentos, fugiu da normalidade, exceto no tratamento 3. Os demais estimadores de α_1 , β_1 , α_2 , β_2 e γ_2 de todos os quatro tratamentos, fugiram da normalidade.

As Figuras apresentadas a seguir foram construídas a partir de simulações feitas pelo programa SAS, para analisar as propriedades dos estimadores.

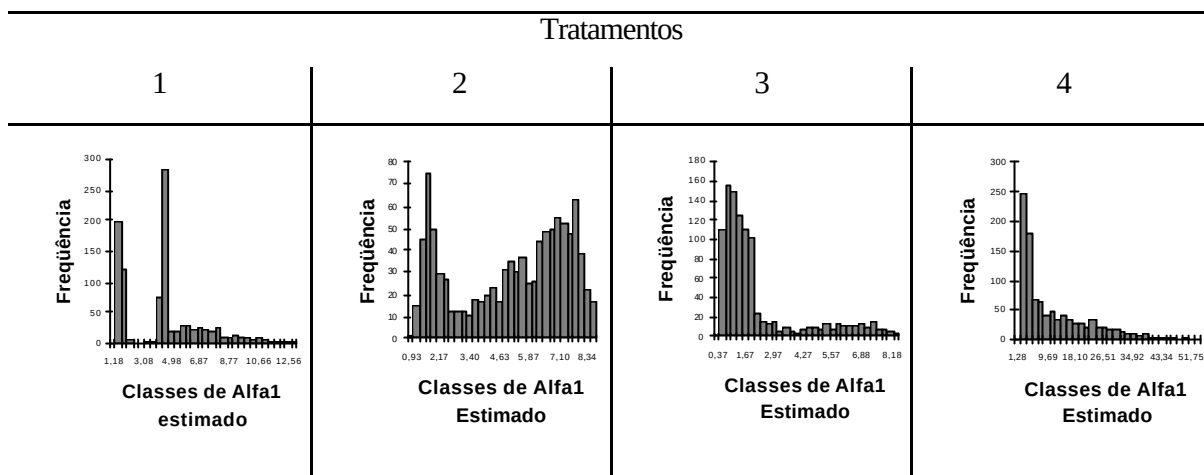


Figura 15 – Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.

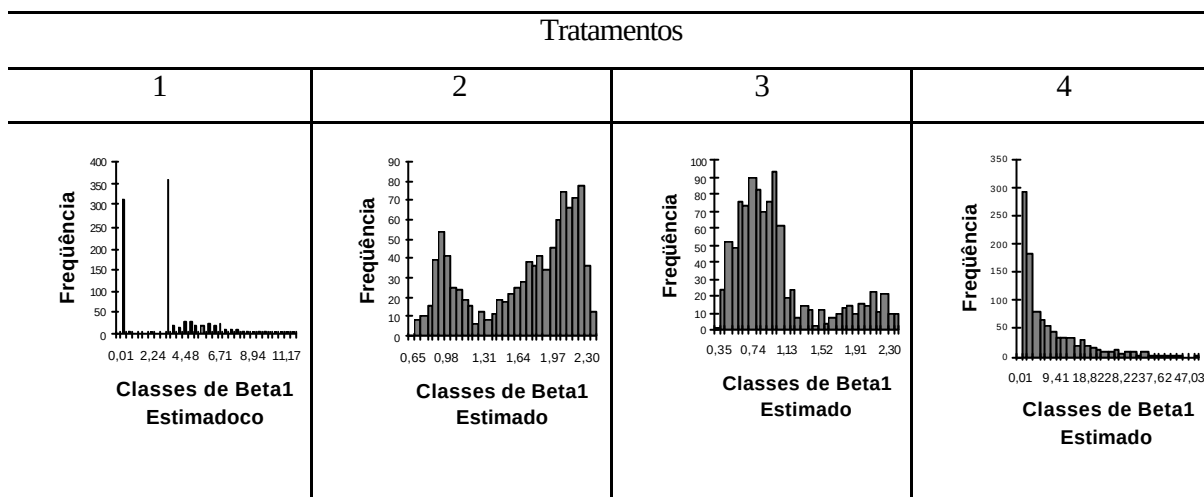


Figura 16 – Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.

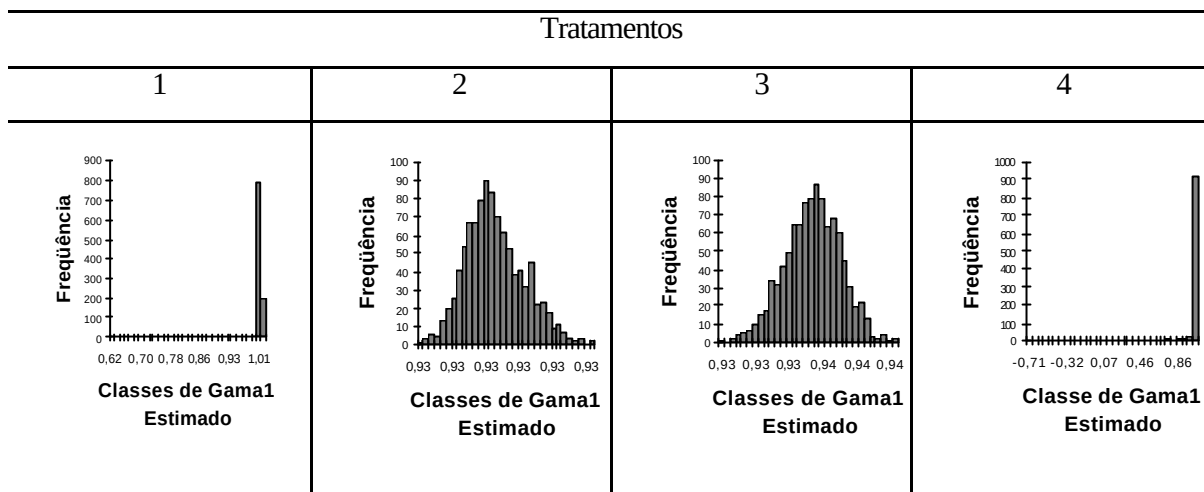


Figura 17 – Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.

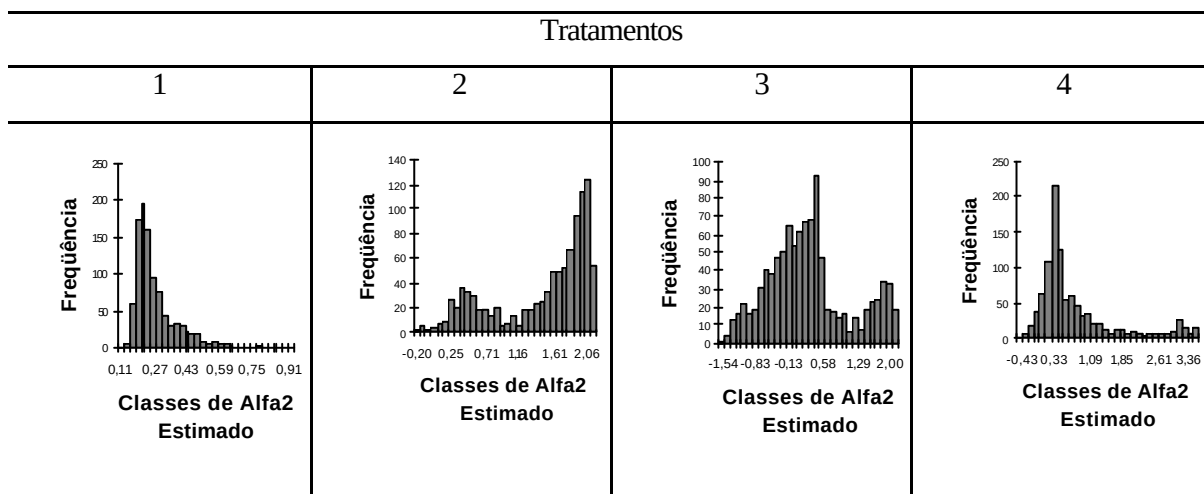


Figura 18 – Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_2$, por tratamento.

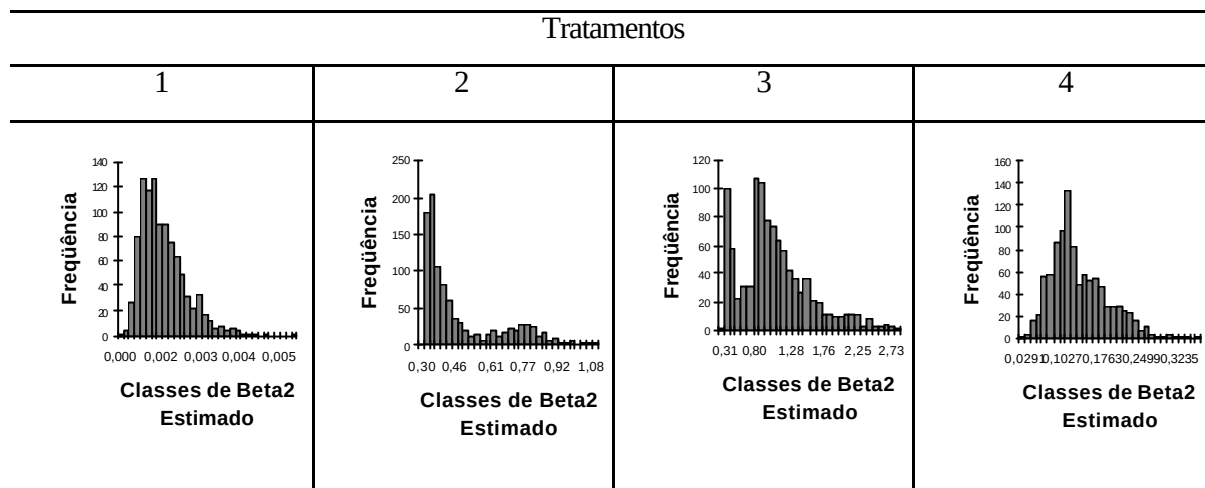


Figura 19 – Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_2$, por tratamento.

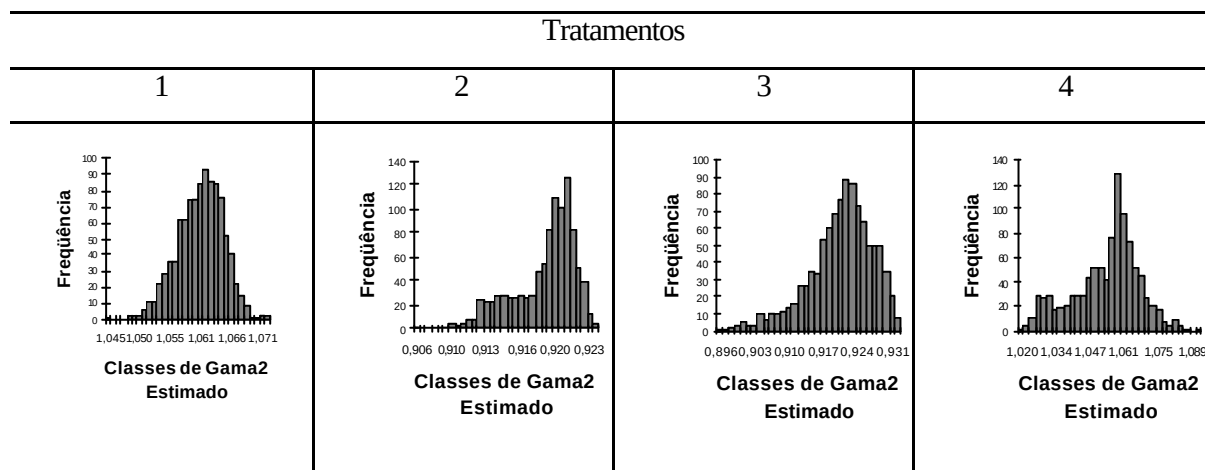


Figura 20 – Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_2$, por tratamento.

Assim, verificou-se a não-normalidade dos estimadores e usou-se a análise de variância não-paramétrica. Também através dos histogramas, mostrou-se que não se

pode reparametrizar por Ratkowsky (1983), usando exponencial nos parâmetros que fogem da normalidade.

4.1.1.4. Testes Estatísticos

Os resultados dos testes de comparação entre os parâmetros estimados ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$) para os tratamentos estão apresentados nas Tabelas a seguir.

Pelo resultado do teste Kruskal-Wallis: $H = 7,308$ ($P=0,063$), o parâmetro Alfas_1 não difere significativamente entre os 4 tratamentos, a 5% de significância

Tabela 12 – Comparação entre Betas_1 , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	6,442 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	3,244 b
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,602 c
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	15,338 db

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=9,462$ ($P=0,024$).

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Pela Tabela 12, mostrou-se que a estimativa de β_1 com o tratamento 1 diferiu de todos os demais tratamentos. O tratamento 4 apenas não diferiu do tratamento 2. Com relação aos tratamentos 2 e 3, eles diferiram entre si.

Tabela 13 – Comparação entre Gamas₁, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	1,000 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,921 a
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,934 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	1,000 c

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=8,774$ ($P=0,032$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Pela Tabela 13, verifica-se que a estimativa de γ_1 com os tratamentos 1, 3 e 4 diferem entre si; o tratamento 1 e 2 não diferem entre si.

Os resultados entre Alfas₂ testados pelo teste Kruskal-Wallis: $H= 6,590$ ($P=0,086$). Mostraram que os tratamentos não difere significativamente entre os 4 tratamentos, a 5% de significância.

Tabela 14 – Comparação entre Betas₂, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	0,001 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,202 b
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	1,166 c
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	0,126 d

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=10,385$ ($P=0,016$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Observa-se, pelos resultados apresentados na Tabela 14, que a estimativa de β_2 com os quatro tratamentos diferem entre si.

Tabela 15 – Comparação entre Gamas₂, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	1,062 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,915 b
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,918 ac
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	1,057 d

Resultados do teste Kruskal-Wallis: H=8,436 (P=0,038) ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Pelos resultados apresentados na Tabela 15, observou-se que a estimativa de β_2 com os tratamentos 1, 3 e 4 diferiram entre si. O tratamento 3 somente não diferiu do tratamento 1.

Da análise dos resultados apresentados nas tabelas de 12 a 15, mostrou-se que as diferentes porcentagens adicionadas de inóculo tiveram efeito significativo. Também, verifica-se que o tratamento 4 obteve um melhor resultado.

4.1.1.5. Sólidos Totais e Voláteis

As reduções nos teores de sólidos voláteis, cujas médias estão apresentadas na Tabela 16 mostram que o período de fermentação de 149 dias para o tratamento 1 e de 64 dias para os tratamentos 4 permitiu valores próximos (32 % em média), mostrando altas reduções para os dois tratamentos. Os tratamentos 2 e 3 com período de fermentação de 64 dias tiveram um desempenho inferior na redução de sólidos voláteis (13%

em média). Esta diferença em favor dos tratamentos 1 e 4 pode ser explicada pelo tempo de retenção hidráulica (TRH) no tratamento 1 e pela quantidade adicionada de inóculo no tratamento 4.

Tabela 16 – Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %

Trat	Entrada				Saída				Red. de SV (%)
	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	
1	8,12	4,871	7,18	4,309	6,32	3,792	4,85	2,912	32,43
2	8,48	5,086	7,37	4,421	7,56	4,534	6,38	3,829	13,39
3	8,68	5,211	7,35	4,408	7,57	4,544	6,4	3,838	12,92
4	8,75	5,251	7,45	4,468	6,27	3,761	5,04	3,024	32,32

A Tabela 17 mostra os resultados das análises estatísticas das reduções de sólidos totais, em %, para os quatro tratamentos nos efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo e tempo de retenção hidráulica (TRH).

Tabela 17 – Comparação das reduções de sólidos totais, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	1,719 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,823 a
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	1,111 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	2,352 c

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=9,462$ ($P=0,024$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Analisando os resultados apresentados no Tabela 17, pode-se verificar que houve diferença significativamente na redução média de sólidos totais, devido ao efeito da variação da quantidade de estrume, água e inóculo, assim, observa-se que os tratamentos 2 e 3 diferem entre si, como também diferem do tratamento 4. O tratamento 2 não difere dos demais..

Na Tabela 18 estão apresentados os resultados das reduções de sólidos voláteis, em %, para os quatro tratamentos nos efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo e tempo de retenção hidráulica (TRH).

Tabela 18 – Comparação das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
1-Estrume 25(kg) +Água 35 (kg) Inóculo 0 (kg)	9,850 a ⁽¹⁾
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	2,390 b
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,240 c
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	4,320 a

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=9,974$ ($P=0,019$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Por meio da análise dos resultados apresentados no Tabela 18, verifica-se que as reduções médias de sólidos voláteis dos tratamentos diferem entre si. E que o tratamento 4 não difere do tratamento 1. Assim, mostrou-se que mesmo com menor Tempo de Retenção Hidráulica (TRH) do tratamento 4 em relação ao tratamento 1, pode-se obter resultados sem diferenças significativas da redução de sólidos voláteis.

4.1.2. Produção de Biogás do Segundo Ciclo

Para esse ciclo, o tempo de retenção hidráulica (TRH) foi de 84 dias (de 02/07/2002 a 28/11/2002) para os tratamentos 2, 3 e 4. No 84^o dia, os biodigestores dos três tratamentos mantinham a produção acumulada muito baixa. Optou-se por encerrar produção de biogás e determinar a produção acumulada aos 84 dias, bem como analisar os tempos gastos pelos biodigestores para atingir essa produção.

Os valores do total do volume de biogás, em m³, durante os 84 dias de produção de biogás, para cada tratamento estudado do segundo ciclo, estão apresentados na Tabela 19. Observa-se que o total do volume mínimo durante os 84 dias foi de 0,76547m³, observado no tratamento 2.

Comparando as Tabelas 8 e 19, nota-se que o tratamento 4 teve um aumento significativo em média no total do volume acumulado de biogás, de aproximadamente 1,29289 (m³) para 1,84987 (m³), em relação ao ciclo 1. Os tratamentos 2 e 3 também obtiveram aumento. Como já foi comentado anteriormente, devido ao fato da interferência da temperatura.

Tabela 19 – Valores do total do volume, em m³, durante os 84 de produção de biogás, para cada tratamento estudado do segundo ciclo.

Tratamento	biodigestor	dias	Volume Acumulado (m ³)	Média
2	10	84	0,23116	0,76547
2	11	84	0,24939	
2	12	84	0,28492	
3	13	84	0,90372	0,90638
3	14	84	0,89130	
3	15	84	0,92414	
4	16	84	1,81820	1,84987
4	17	84	1,84258	
4	18	84	1,88885	

4.1.2.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz

4.1.2.1.1. Médias das Repetições dos Tratamentos

Através do ajuste do modelo Gompertz , para a média das repetições do tratamento 4, são apresentados, na Tabela 20, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

O modelo Gompertz (sem mistura) foi ajustado somente para o tratamento 4, pois para dos demais tratamentos esse modelo não foi adequado.

Tabela 20 – Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{\sigma}^2$), no 2º ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	n	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{g}$	R^2 (%)	$\hat{\sigma}^2$
2	4	84	0.6349	2.9076	0.9424	99,67	0.00110

Observou-se que o ajuste do modelo para o volume acumulado de biogás foi bem adequado. A variância residual e o coeficiente de determinação mostram a qualidade do ajuste (Tabela 20 e Figura 21).

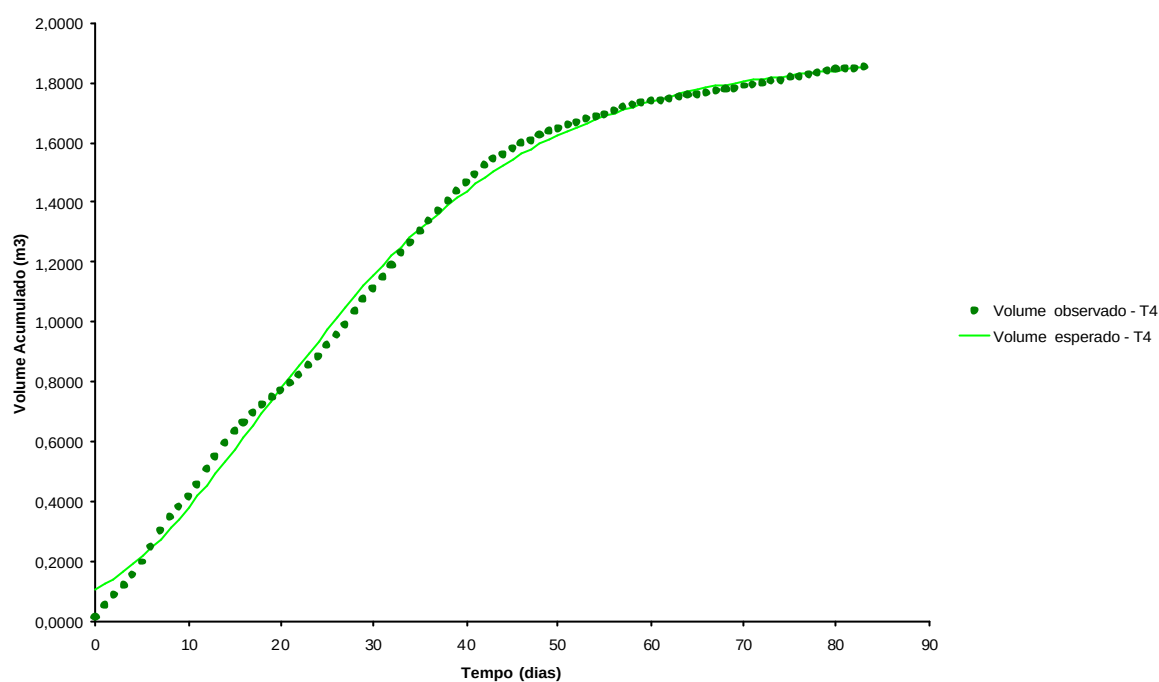


Figura 21 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições do tratamento 4.

A Figura 22, mostra a curva de velocidade de produção do biogás, ao longo do tempo em dias, do tratamento 4 do segundo ciclo.

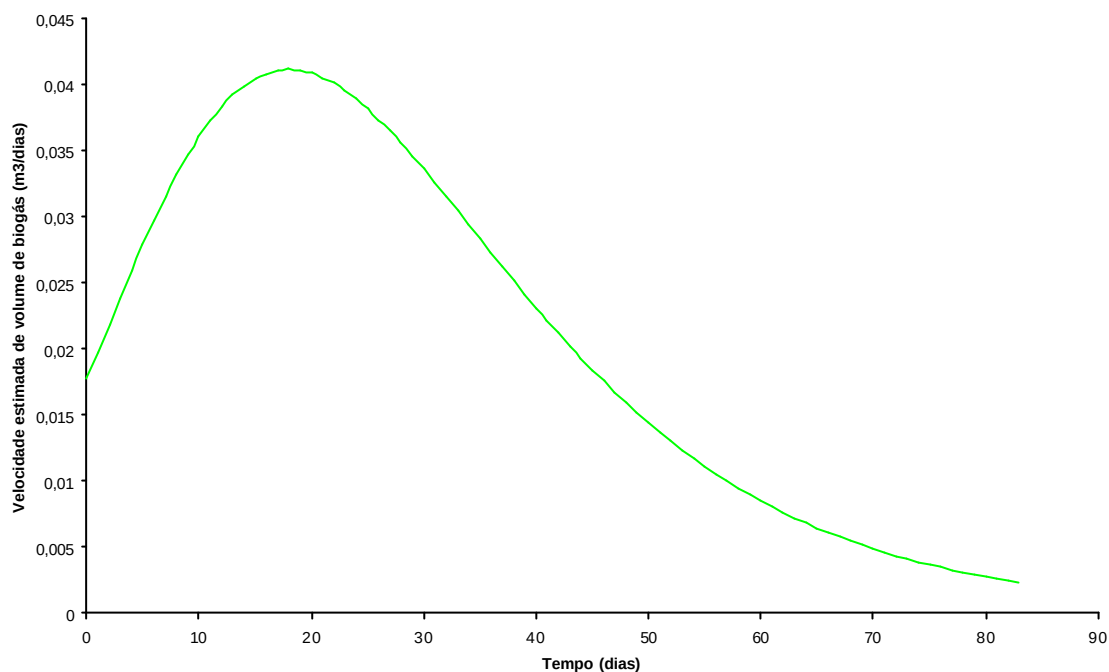


Figura 22 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do segundo ciclo.

Observa-se uma crescente velocidade de produção do biogás no início do processo até aproximadamente o 20^o dia e a partir daí, uma velocidade decrescente até o final do processo. Também do ponto de vista gráfico observou-se que a quantidade de inóculo (24kg) adicionada no tratamento 4 resultou em uma maior velocidade de produção do biogás ao longo do experimento (Figura 22).

4.1.2.1.2. Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 22, a seguir, estão apresentadas, com todas repetições dos tratamentos, os números de observações, as estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

Tabela 22 – Números de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	n	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{g}$	R^2 (%)	$\hat{s}^2$
2	4	84	0.6155	2.925	0.941	99,68	0.00104
2	4	84	0.6342	2.898	0.943	99.66	0.00113
2	4	84	0.6551	2.902	0.943	99.67	0.00115

Observou-se algumas características da qualidade do ajuste (Tabela 22). Os coeficiente de determinação (R^2) e as variâncias residuais caracterizaram a eficiência do modelo.

Na Figura 23, estão apresentados os volumes acumulado e ajustado pelo modelo, em função do tempo em dias, nas três repetições do tratamento 4

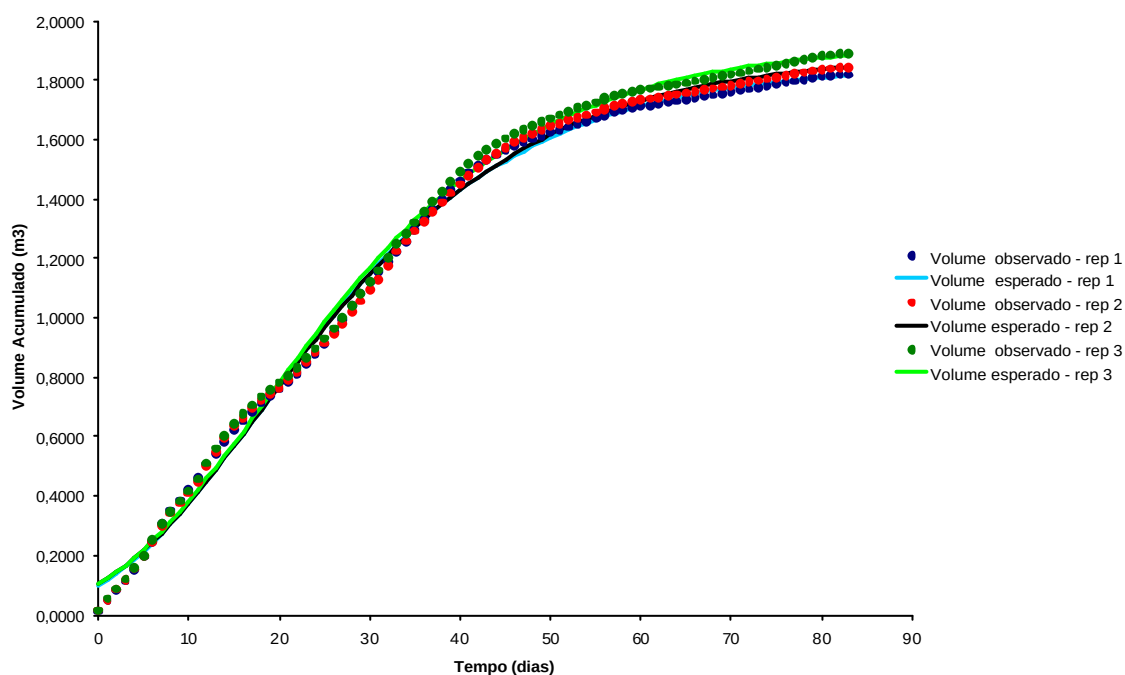


Figura 23 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.

4.1.2.2. Modelagem Usando Mistura de Exponencial com Gompertz

4.1.2.2.1. Médias das Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 23, encontram-se algumas características da qualidade do ajuste de mistura de Exponencial com Gompertz, com a média das repetições dos tratamentos, através das estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

Tabela 23 – Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	n	$\hat{a}_1$	$\hat{b}_1$	$\hat{g}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{b}_2$	$\hat{g}_2$	R^2 (%)	$\hat{s}^2$
2	2	84	10.053	0.077	0.827	2.303	0.0025	1.024	99.28	0.00002
2	3	84	0.946	0.077	0.858	-0.136	0.0001	1.1264	99.82	0.00012

Observa-se também, pela Tabela 23, que estimativas dos parâmetros não são muito próximas, isto é, existem diferenças entre os tratamentos, assim pressupõe que as velocidades instantâneas são diferentes. O coeficiente de determinação (R^2) alto e também por serem baixas as variâncias residuais verifica-se a eficiência do modelo.

Através da Figura 24, observou-se que o ajuste do modelo para o volume acumulado de biogás foi bem adequado. Os dois tratamentos tiveram comportamento bem próximos na produção de biogás, mas com uma velocidade instantânea maior no tratamento 3, a partir do 57º dia.

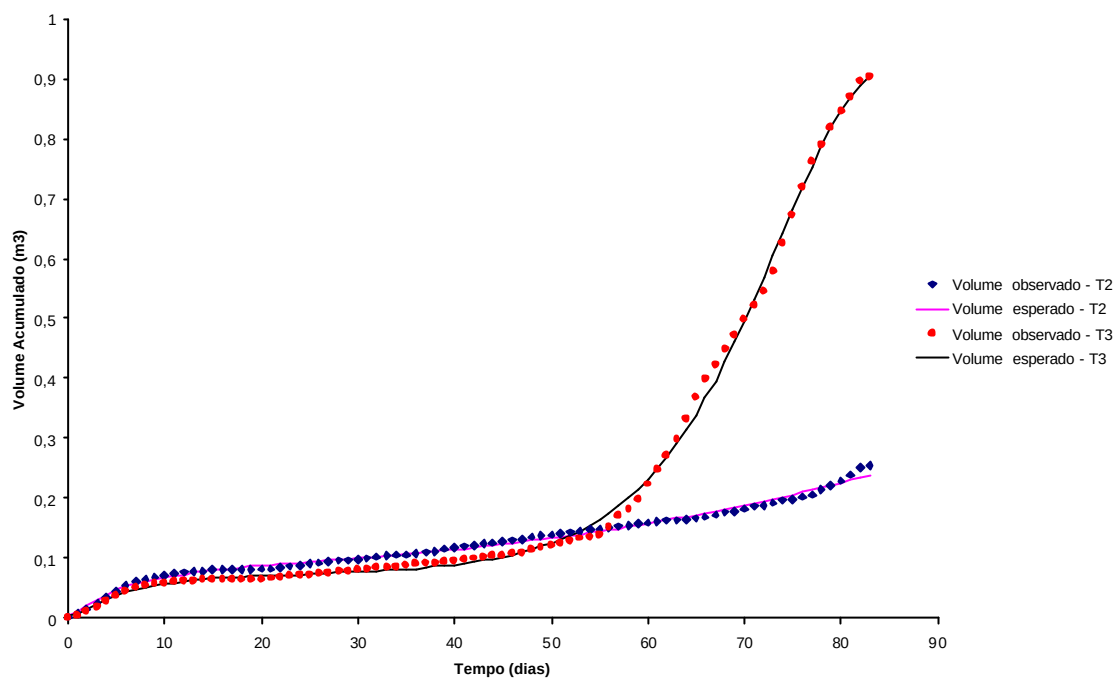


Figura 24 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições dos dois tratamentos.

Nas Figuras 25, 26 e 27, estão apresentados as curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás ao longo do tempo em dias para cada tratamento do segundo ciclo.

Observa-se uma velocidade de produção do biogás para o tratamento 2 decrescente nos primeiros dias e, após o 20^o dia (aproximadamente) uma velocidade crescente. Mostrou-se um razoável resultado da produção do biogás (Figura 25).

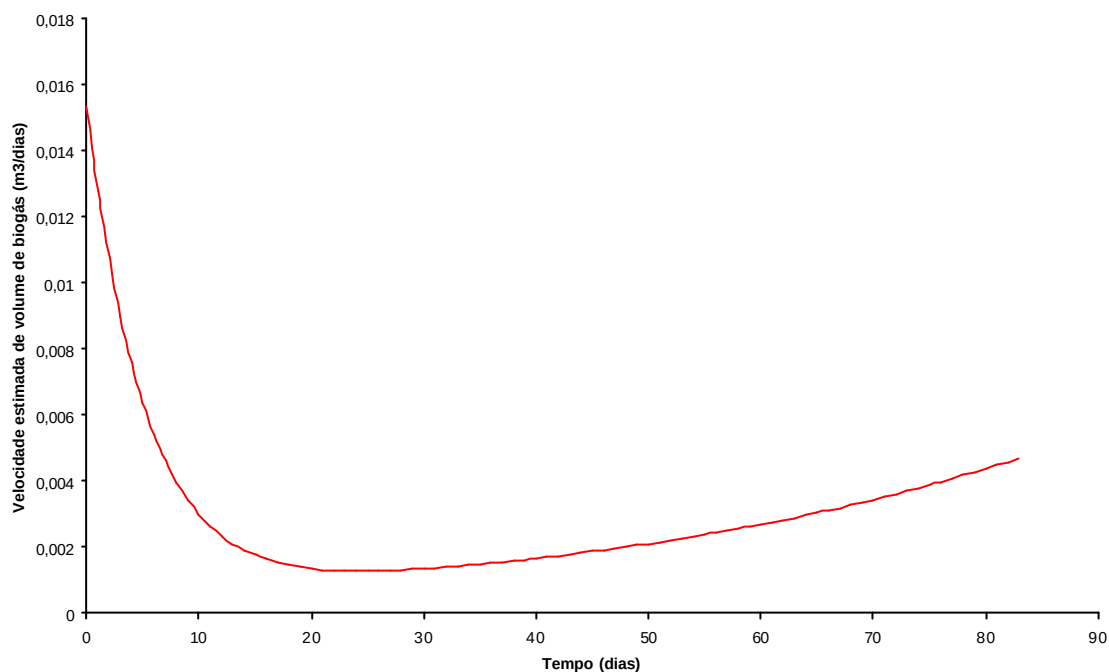


Figura 25 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do segundo ciclo.

Observou-se na Figura 26, que a velocidade de produção do biogás para o tratamento 3 no início do processo foi decrescente, uma pequena estabilização da velocidade entre 20^o e 30^o dias, com uma velocidade crescente a partir do 30^o dia e, a partir do 70^o dia com velocidade decrescente até o final do processo. Mostrou-se um bom resultado da produção do biogás entre o 50^o e 80^o dias.

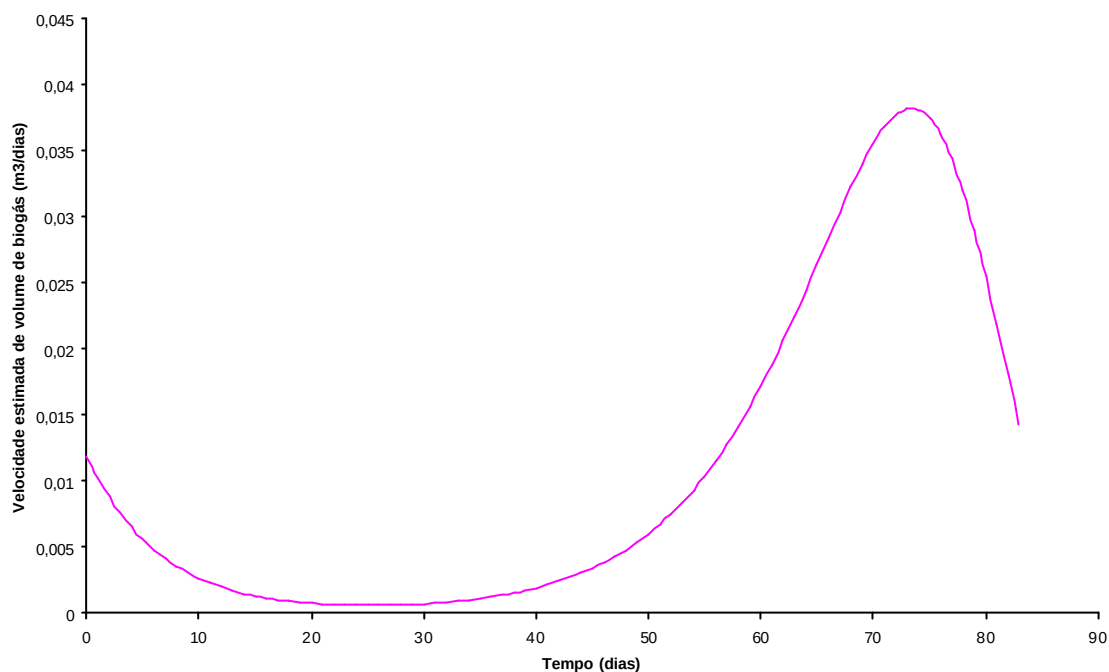


Figura 26 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do segundo ciclo.

A Figura 27 mostra um bom resultado da produção do biogás ao longo do tempo em dias. Observa-se uma crescente velocidade de produção do biogás para o tratamento 4 no início do processo até aproximadamente ao 20^o dia e, a partir desse dia uma velocidade decrescente até o final do processo. Também do ponto de vista gráfico observou-se que a quantidade de inóculo adicionada no tratamento 4 resultou em uma maior velocidade de produção do biogás ao longo do período experimental em relação aos demais tratamentos.

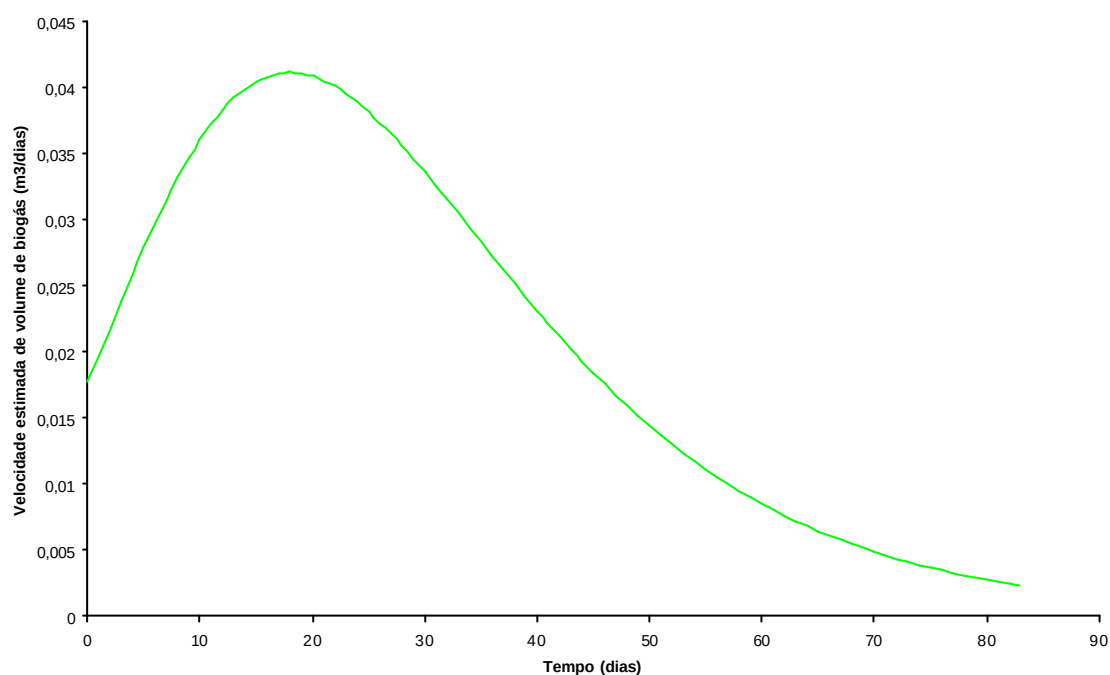


Figura 27 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do primeiro ciclo.

Embora os três tratamentos tenham mostrado bons resultados, o tratamento 4 iniciou com velocidade maior. A porcentagem maior de inóculo (24kg) adicionada nesse tratamento possibilitou velocidade instantânea inicial superior, em comparação com a dos demais tratamentos (Figura 28).

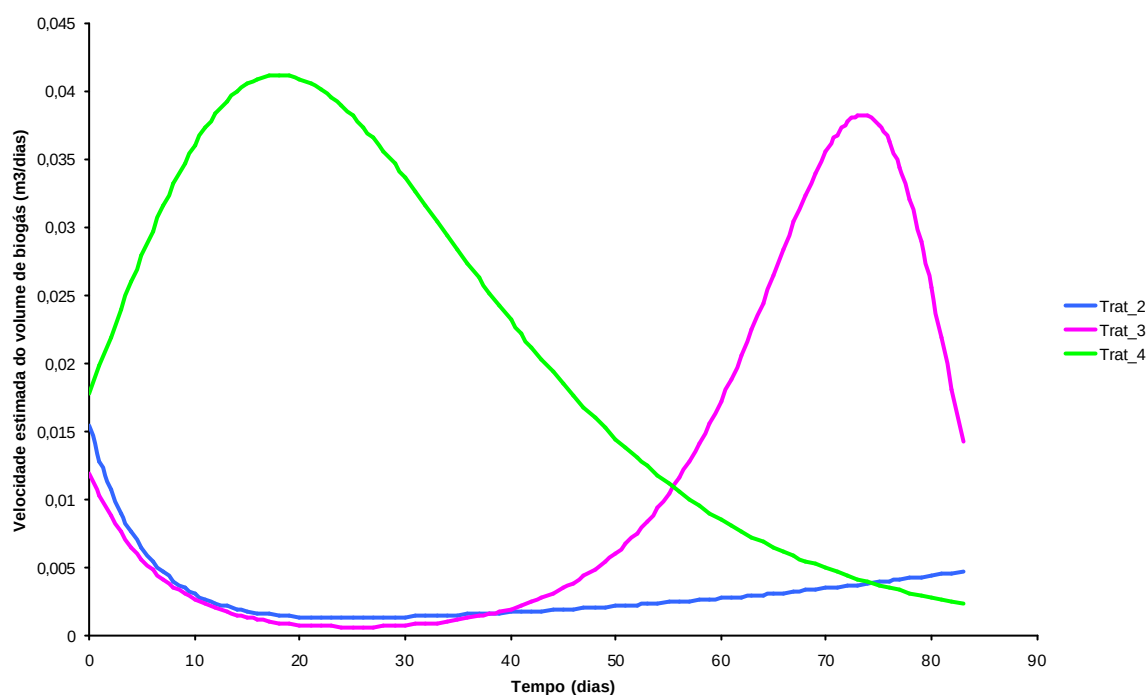


Figura 28 – Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 3 tratamentos do segundo ciclo.

4.1.2.2.2. Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 24, encontram-se algumas características da qualidade do ajuste de mistura de Exponencial com Gompertz e, com as repetições dos tratamentos, através das estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$), para dos tratamentos 2 e 3.

Tabela 24 – Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 2º ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	Rep	n	$\hat{a}_1$	$\hat{b}_1$	$\hat{g}_1$	$\hat{a}_2$	$\hat{b}_2$	$\hat{g}_2$	R^2	$\hat{s}^2$
2	2	1	84	0.2670	0.067	0.762	-1.493	0.097	1.034	94.96	0.00002
2	2	2	84	10.017	0.093	0.918	2.294	0.001	1.054	98.98	0.00003
2	2	3	84	10.476	0.094	0.883	2.341	0.001	1.033	98.96	0.00004
2	3	1	84	0.9444	0.082	0.864	-0.14	0.001	1.126	99.82	0.00011
2	3	2	84	0.9207	0.078	0.871	-0.16	0.001	1.131	99.79	0.00013
2	3	3	84	0.9683	0.073	0.838	-0.10	0.001	1.124	99.80	0.00013

Analisando a Tabela 24, observa-se que o coeficiente de determinação também foi bem alto em todas as repetições dos dois tratamentos, mostrando assim a boa a qualidade do ajuste. Nota-se que os valores baixos das variâncias residuais, caracterizaram a eficiência do modelo. Como as estimativas dos parâmetros são diferentes, supõe-se que as velocidades instantâneas dos tratamentos também sejam diferentes.

Nas Figuras 29 e 30, estão apresentados os ajustes do modelo para o volume acumulado e esperado, no tempo em dias, nas três repetições dos dois tratamentos.

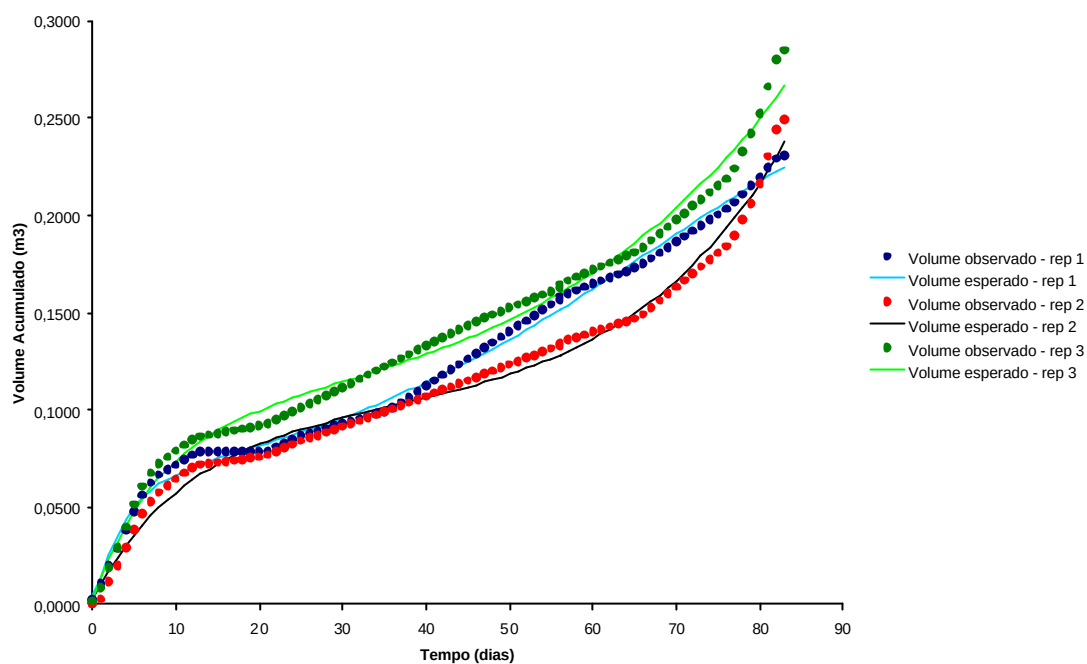


Figura 29 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m³), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.

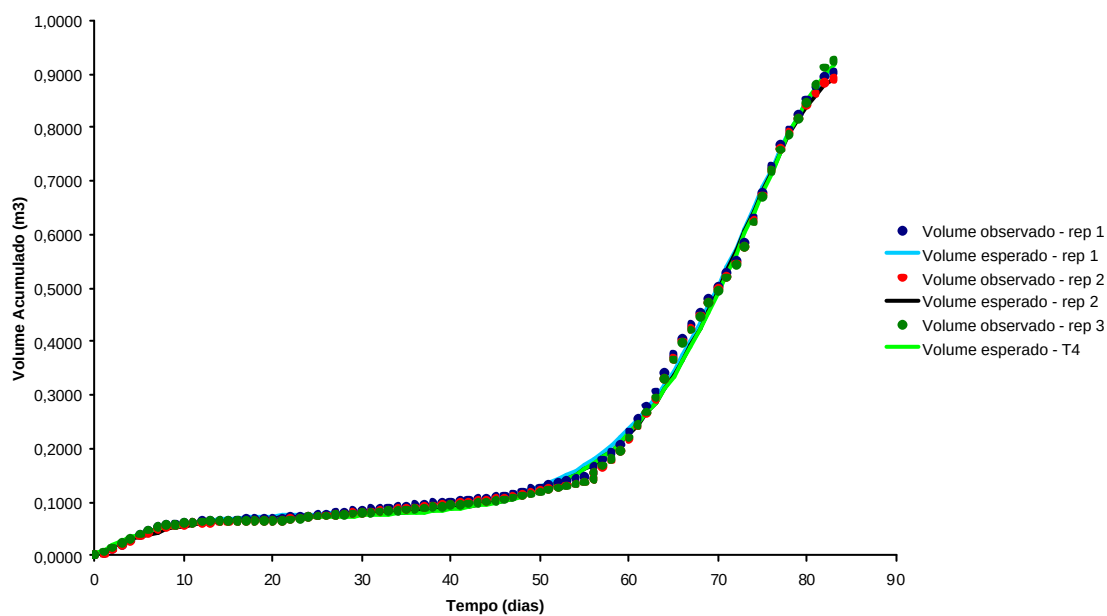


Figura 30 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m³), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.

4.1.2.3. Estudo das Propriedades dos Estimadores dos Parâmetros dos Modelos

A Tabela 25, a seguir, mostra o teste de normalidade da distribuição amostrais dos estimadores de α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 e γ_2 dos dois modelos, segundo os três tratamentos.

Tabela 25 – Níveis descritivos (p-value) dos testes de normalidade das distribuições amostrais dos estimadores dos parâmetros do modelo, segundo os 3 tratamentos do 2^o ciclo.

Ciclo	Trat	Distribuição Amostral					
		$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\gamma}_1$	$\hat{\alpha}_2$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\gamma}_2$
2	2	<0,0001	0,1683	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
2	3	0,0015	0,3001	<0,0001	0,1854	<0,0001	0,8061
2	4	0,1217	0,0005	-	-	-	-

Como já foi comentado, pelo teste, se o nível descritivo for menor que 0,05 os dados não seguem uma distribuição normal. Assim, foi reparametrizada a equação, colocando exponencial em α_1 , β_1 , γ_1 , α_2 , β_2 , e γ_2 . Mesmo assim não ocorreu a normalidade da distribuição amostral, mostrando que é assimétrica. Logo, não foi aceita a reparametrização e usou-se a análise de variância não-paramétrica para todo o estudo dos modelos.

As Figuras a seguir mostram a distribuição amostral dos estimadores, segundo os três tratamentos.

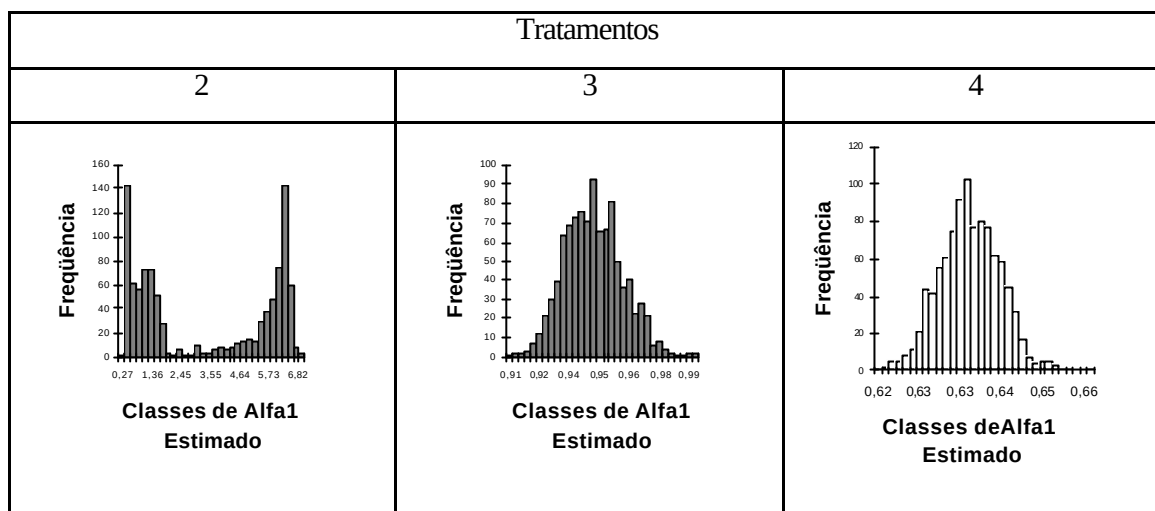


Figura 31 – Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.

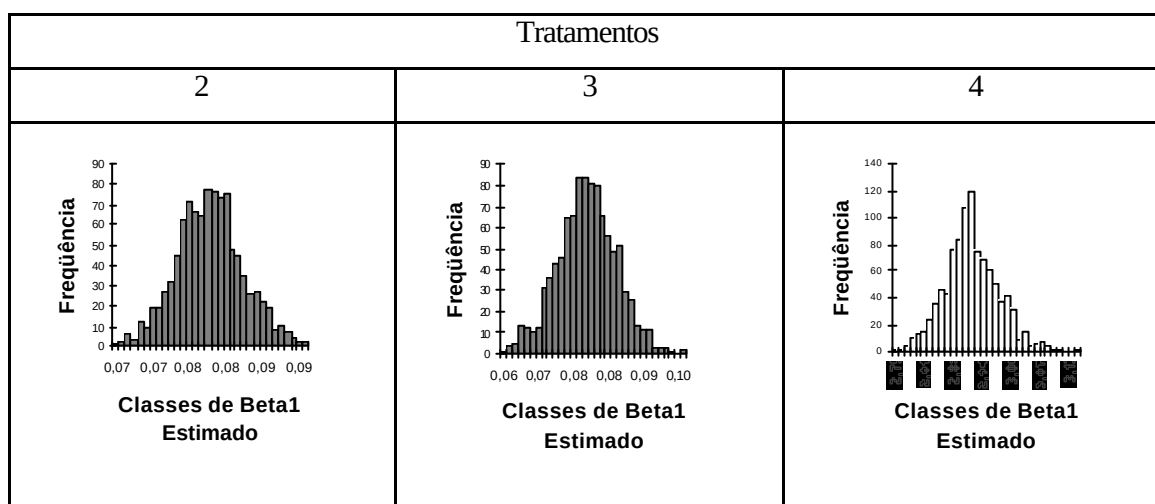


Figura 32 – Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.

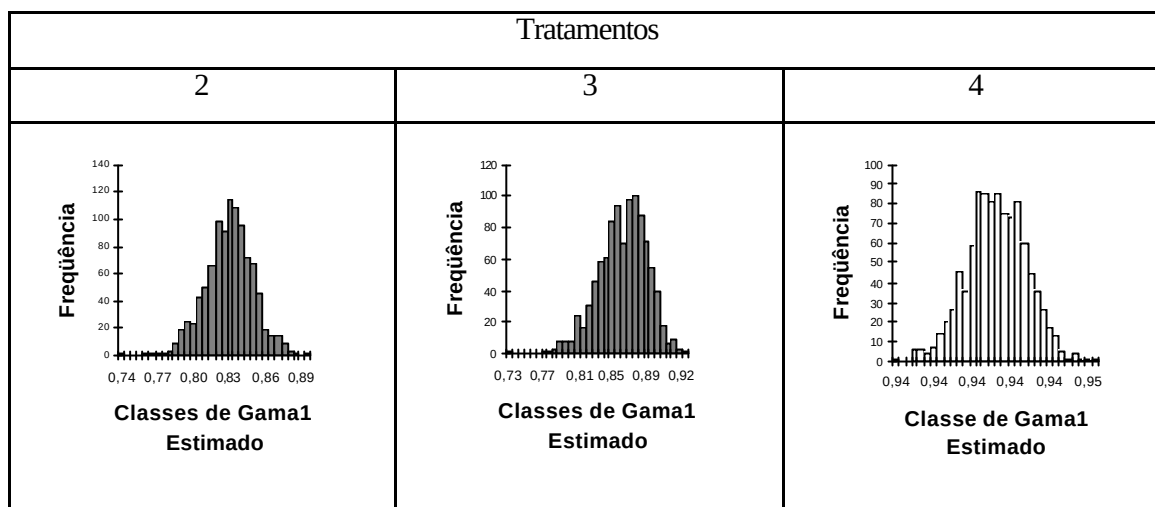


Figura 33 – Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.

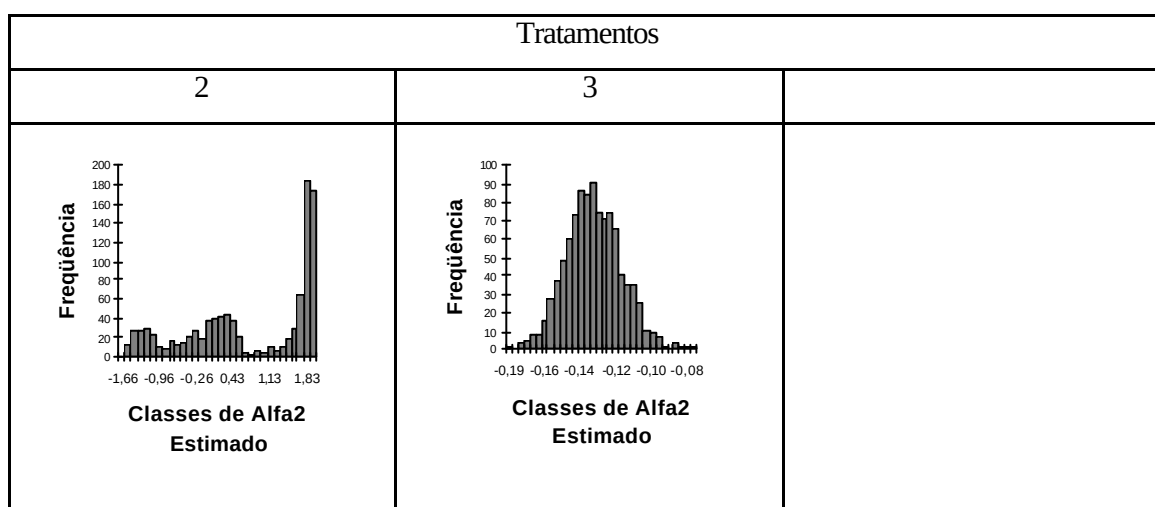


Figura 34 – Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_2$, por tratamento.

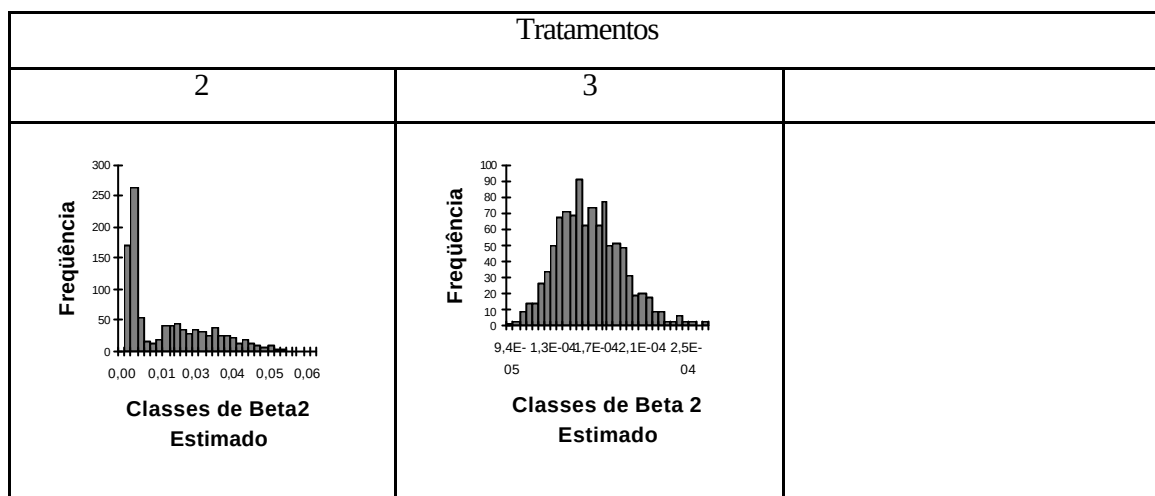


Figura 35 – Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_2$, por tratamento.

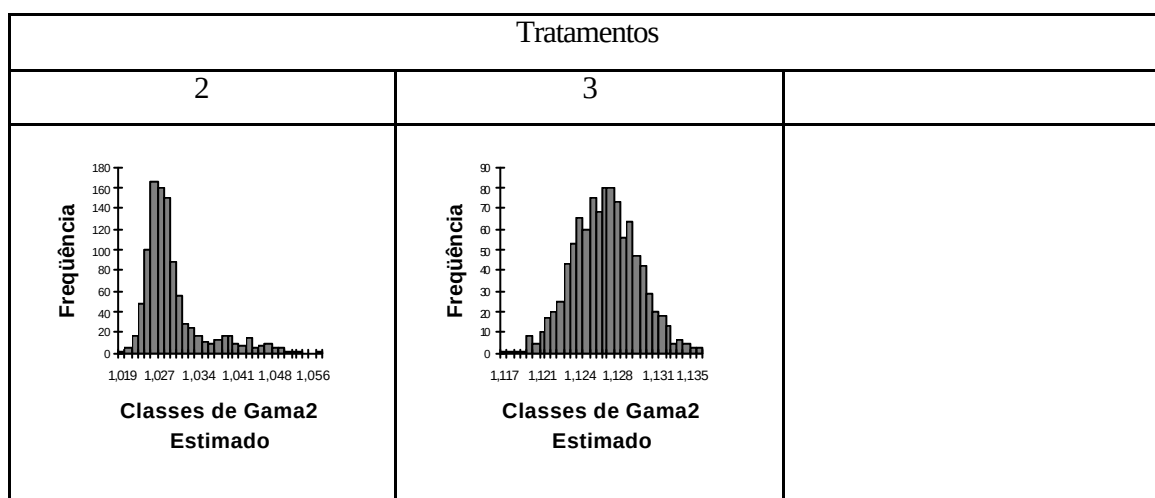


Figura 36 – Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_2$, por tratamento.

4.1.2.4. Testes Estatísticos

Os resultados dos testes de comparação dos parâmetros estimados ($\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$, $\hat{g}_1$, $\hat{a}_2$, $\hat{b}_2$ e $\hat{g}_2$) de Mann-Whitney, para cada um dos dois tratamentos, representados pela mediana, em todas as situações não diferiram entre si, a 5% de significância. Logo, podemos concluir que a porcentagem adicionada de inóculo não obteve efeito significativo.

Uma observação importante: como a modelagem do tratamento 4 foi diferente dos demais tratamentos, não foi necessário fazer inferência estatística, ou seja, pelo fato de usar outro modelo já mostra a diferença entre os demais tratamentos.

4.1.2.5. Sólidos Totais e Voláteis

As reduções nos teores de sólidos voláteis (SV), apresentados na Tabela 26 mostram que o período de fermentação de 84 dias para todos os tratamentos, permitiu valores próximos (43 % em média) para o tratamento 4, os tratamentos 2 e 3 tiveram um desempenho inferior na redução de sólidos voláteis (26% e 34% em média, respectivamente). As diferenças de reduções nos três tratamentos podem ser explicada pela quantidade de inóculo adicionada em cada tratamento.

Tabela 26 – Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %

Tratamento	Entrada				Saída				Redução de SV
	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	
2	8,87	5,322	7,70	4,620	6,80	4,077	5,73	3,437	25,61
3	8,98	5,386	7,88	4,731	6,05	3,630	5,19	3,111	34,24
4	8,62	5,169	7,45	4,471	5,45	3,273	4,26	2,555	42,85

Os resultados das reduções de sólidos totais, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis para os três tratamentos, representadas pela mediana: $H=0,800$ ($P=0,0721$). Mostraram que os tratamentos não diferem significativamente a 5% de significância, ou seja, as diferentes porcentagens de inóculos adicionadas em cada um dos três tratamentos não afetaram nas reduções de sólidos totais.

Na Tabela 27 estão apresentados os resultados das reduções de sólidos voláteis, em %, para os três tratamentos nos efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo e tempo de retenção hidráulica (TRH).

Tabela 27 – Resultados das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no primeiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	2,270 a ⁽¹⁾
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	2,220 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	7,850c

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=5,600$ ($P=0,050$) ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Os resultados apresentados na Tabela 27 permitem concluir, que o efeito do estrume, água inóculo foi significativo, ou seja, os tratamentos diferem entre si.

4.1.3. Produção de Biogás do Terceiro Ciclo

Este ciclo durou 77 dias (de 28/11/2002 a 13/2/2003) para os tratamentos 2, 3 e 4. Porém, já no 77^o dia, os biodigestores dos tratamentos mantinham a produção acumulada muito baixa. Optou-se por encerrar a produção de biogás e determinar a produção acumulada aos 77 dias, bem como analisar os tempos gastos pelos biodigestores para atingir essa produção.

Os valores do total do volume de biogás, em m³, durante os 77 dias da produção de biogás, para cada tratamento estudado no ciclo 3, estão apresentados na Tabela 28.

Observa-se, que o total do volume mínimo durante os 77 dias foi de 1,39028 m³, observado no tratamento 4. Mostrou-se que no tratamento 4 o total produzido foi menor; porém, se dividido pela quantidade de estrume adicionado, o resultado aumenta. Uma observação interessante é que os dados estão bons e mostram que, em épocas mais quentes pode-se diminuir a quantidade de inóculo, mas os efeitos sobre o tempo para produção de biogás permanecem com o aumento de inóculo (Tabela 28).

Tabela 28 – Valores do total do volume, em m³, durante os 84 dias da fase de partida, para cada tratamento estudado do terceiro ciclo.

tratamento	biodigestor	dias	Volume Acumulado (m ³)	Média
2	10	77	1,60689	1,63013
2	11	77	1,63510	
2	12	77	1,64841	
3	13	77	1,75817	1,77843
3	14	77	1,76600	
3	15	77	1,81111	
4	16	77	1,34036	1,39028
4	17	77	1,43035	
4	18	77	1,40013	

4.1.3.1. Modelagem Usando uma Função Gompertz

Escolheu-se a função Gompertz para modelar a produção acumulada do biogás em todos os tratamentos do terceiro ciclo.

4.1.3.1.1. Médias das Repetições dos Tratamentos

Através do ajuste do modelo Gompertz, com a média das repetições dos três tratamentos, são apresentados, na Tabela 29, número de observações, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{s}^2$), segundo o tratamento 4.

Tabela 29 – Número de observações (n), estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 3^o ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	n	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{g}$	R^2	$\hat{s}^2$
3	2	76	0.6802	3.0211	0.9629	99,61	0.00104
3	3	76	0.7179	2.5980	0.9608	99.50	0.00147
3	4	76	0.3441	2.4313	0.9273	99.49	0.000859

Os valores altos dos coeficientes de variação (R^2), apresentados na Tabela 29, indicam uma boa qualidade do ajuste.

Na Figura 37, está apresentado o modelo ajustado para o volume acumulado, no tempo em dias, com médias das repetições dos três tratamentos.

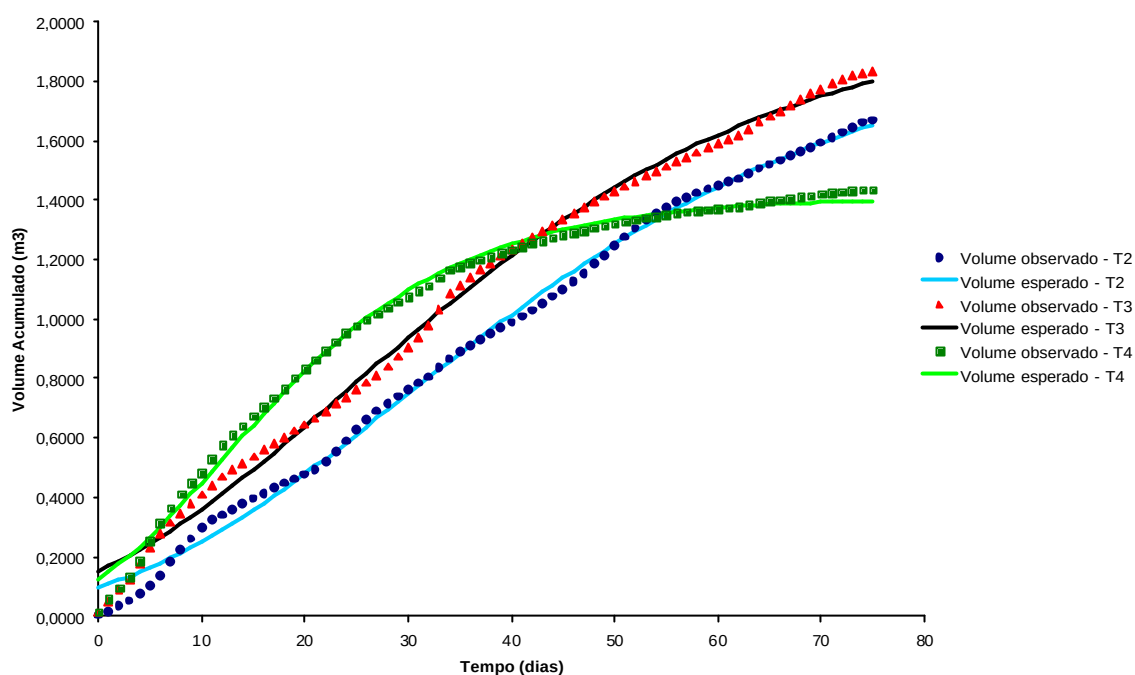


Figura 37 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o segundo ciclo. Com médias das repetições dos três tratamentos.

É interessante observar na Figura 37, a qualidade dos ajustes, indicando que o modelo foi adequado para todos os tratamentos.

Nas Figuras 38, 39 e 40, estão apresentadas as curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás para cada tratamento do terceiro ciclo.

Através da Figura 38, observou-se uma velocidade de produção do biogás crescente no início do processo até aproximadamente ao 30^o dia e a partir desse dia a velocidade foi decrescente. Mostrou-se um bom resultado da produção do biogás ao longo do experimento.

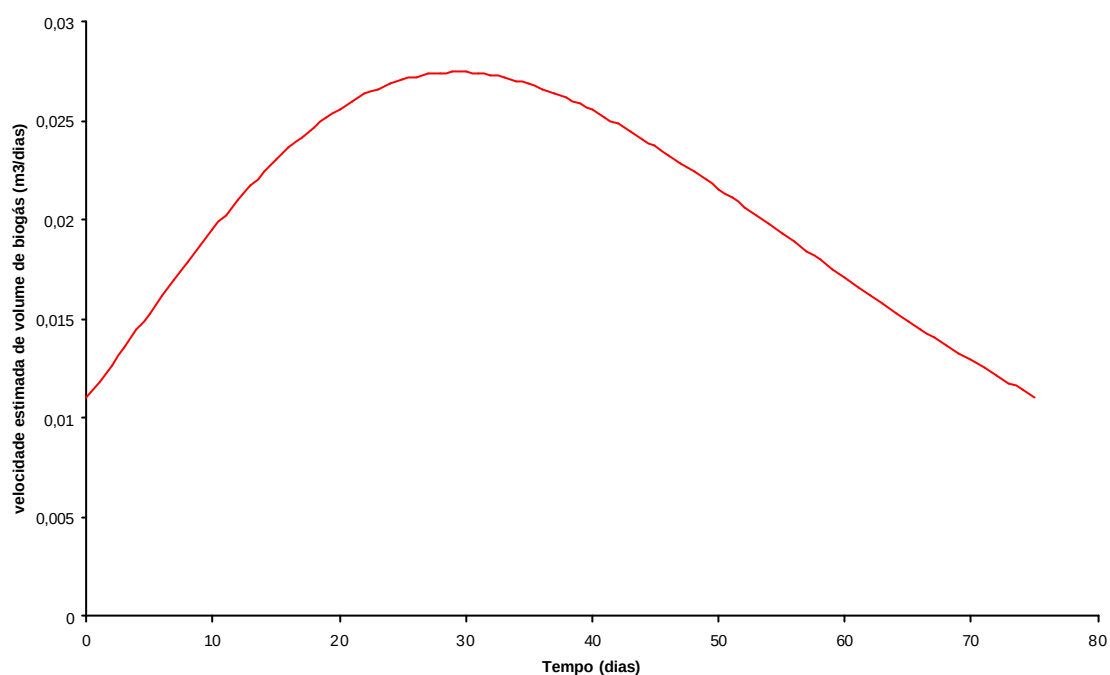


Figura 38 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 2 do terceiro ciclo.

Observou-se uma velocidade de produção do biogás crescente no início do processo até aproximadamente o 25^o dia e a partir desse dia a velocidade foi decrescente. Mostrando também um bom resultado da produção do biogás ao longo do tempo em dias (Figura 39).

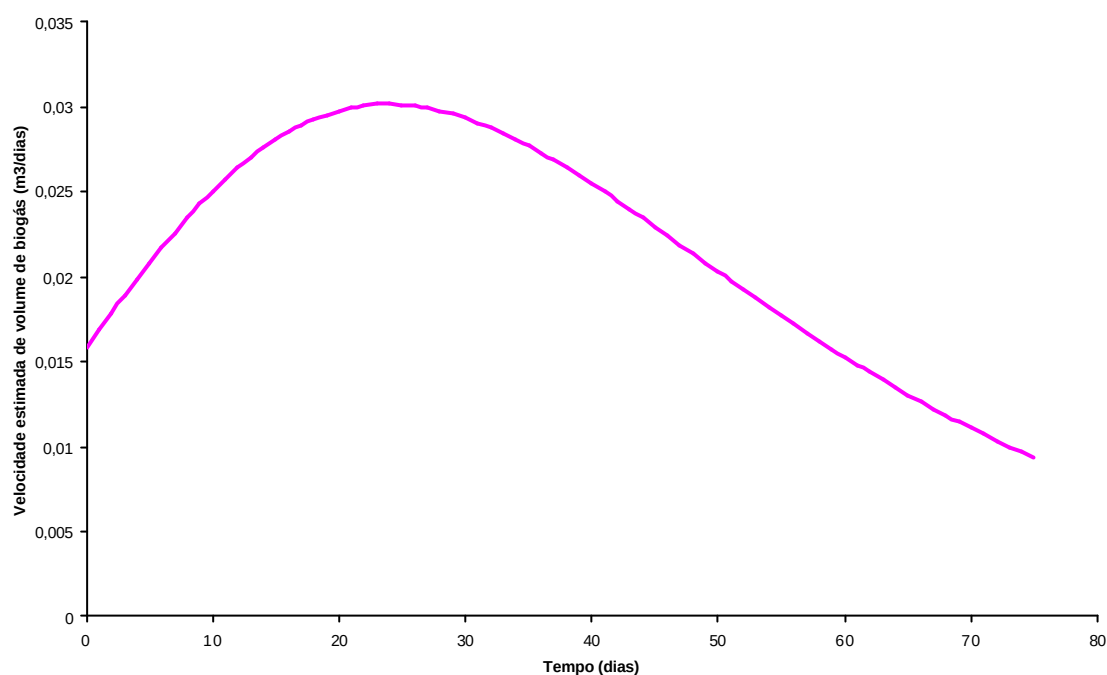


Figura 39 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 3 do terceiro ciclo.

Através da Figura 40, observou-se uma velocidade de produção do biogás crescente no início do processo até aproximadamente o 15^o dia e a partir desse dia a velocidade foi decrescente. Mostrou-se uma grande velocidade da produção do biogás no início do processo e, resultando em maior produção de biogás ao final do experimento.

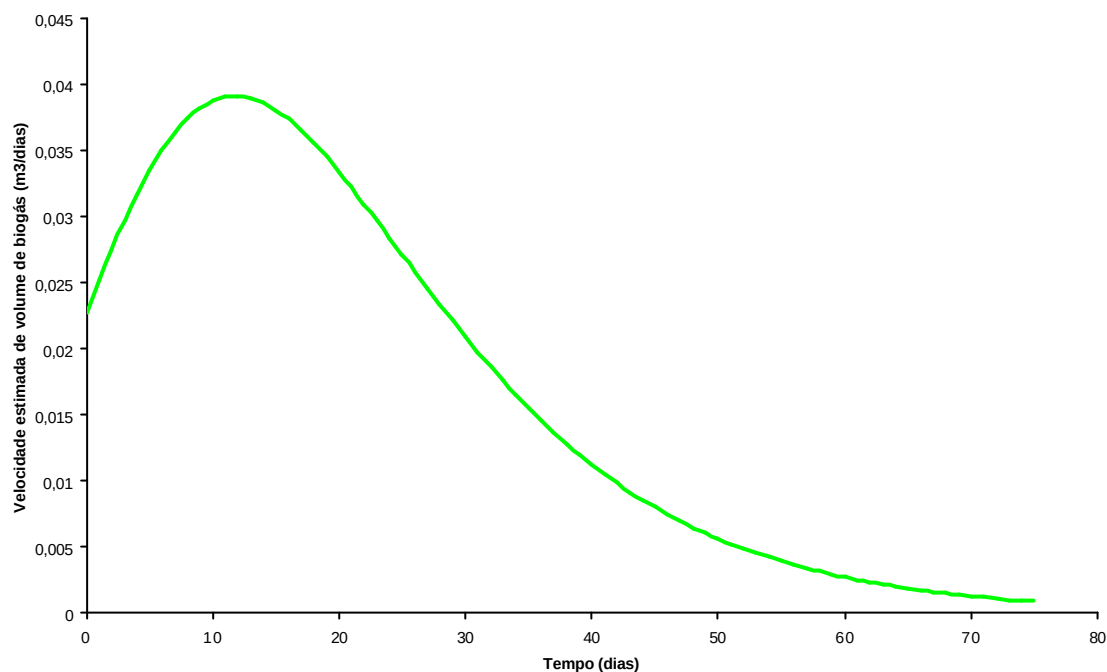


Figura 40 – Curva de velocidade instantânea de produção do biogás do tratamento 4 do terceiro ciclo.

Ao comparar as curvas de velocidades instantâneas dos três tratamentos, Figura 41, verifica-se que o tratamento 4 teve uma maior velocidade de crescimento da produção do biogás, fato também devido a maior quantidade de inóculo adicionada neste tratamento, no qual sabemos que o efeito dos inóculos antecipa o pico de produção de biogás, como também aumenta o potencial efetivo da biomassa.

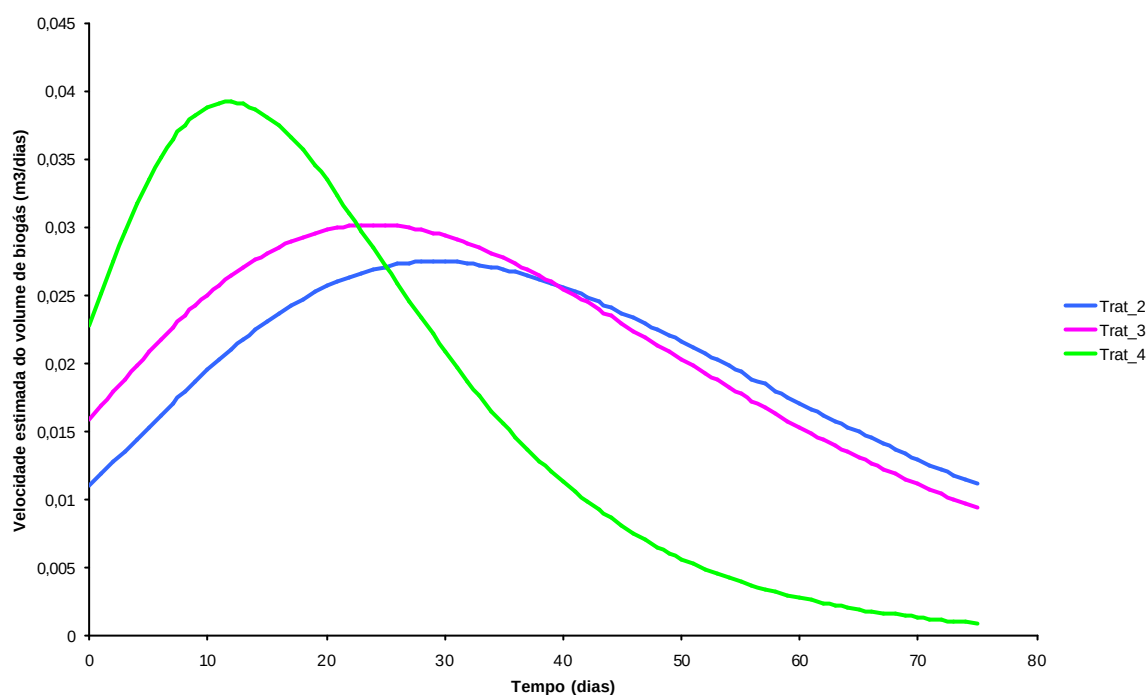


Figura 41 – Curvas de velocidades instantâneas de produção do biogás dos 3 tratamentos do segundo ciclo.

4.1.3.1.2. Repetições dos Tratamentos

Na Tabela 30, a seguir, são apresentadas, com todas repetições dos três tratamentos, as estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)) e variância residual ($\hat{\sigma}^2$).

Tabela 30 – Número de observações (n), repetições, estimativas dos parâmetros ($\hat{a}$, $\hat{b}$ e $\hat{g}$), coeficiente de determinação (R^2 (%)), variância residual ($\hat{s}^2$), no 3^o ciclo e tratamento.

Ciclo	Trat	Rep	n	$\hat{a}$	$\hat{b}$	$\hat{g}$	R^2 (%)	$\hat{s}^2$
3	2	1	76	0.7287	3.0267	0.9662	99.52	0.00124
3	2	2	76	0.6854	3.0502	0.9623	99.59	0.00111
3	2	3	76	0.6393	3.0016	0.9601	99.63	0.00097
3	3	1	76	0.6771	2.6026	0.9575	99.52	0.00137
3	3	2	76	0.7361	2.5697	0.9630	99.48	0.00147
3	3	3	76	0.7416	2.6331	0.9616	99.47	0.00158
3	4	1	76	0.3192	2.4112	0.9262	99.52	0.00075
3	4	2	76	0.3657	2.4598	0.9276	99.49	0.00089
3	4	3	76	0.3477	2.4145	0.9283	99.46	0.00090

Da análise dos resultados apresentados na Tabela 30, indicam algumas características da qualidade do ajuste. Notou-se que o coeficiente de determinação R^2 é bem alto, indicando um bom ajuste, mas, como já foi comentado anteriormente, somente essa medida não é de bom auxílio na discriminação dos modelos.

Nas Figuras a seguir, estão apresentados os ajustes do modelo de Gompertz para o volume acumulado, no tempo em dias, nas três repetições dos três tratamentos.

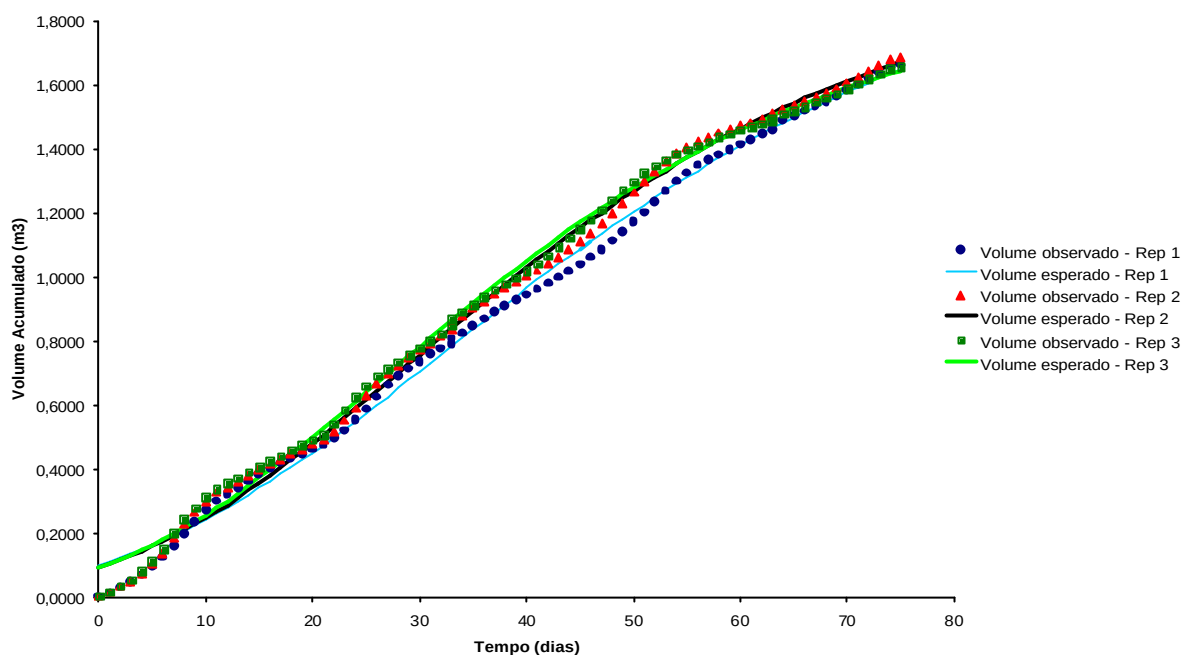


Figura 42 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 2.

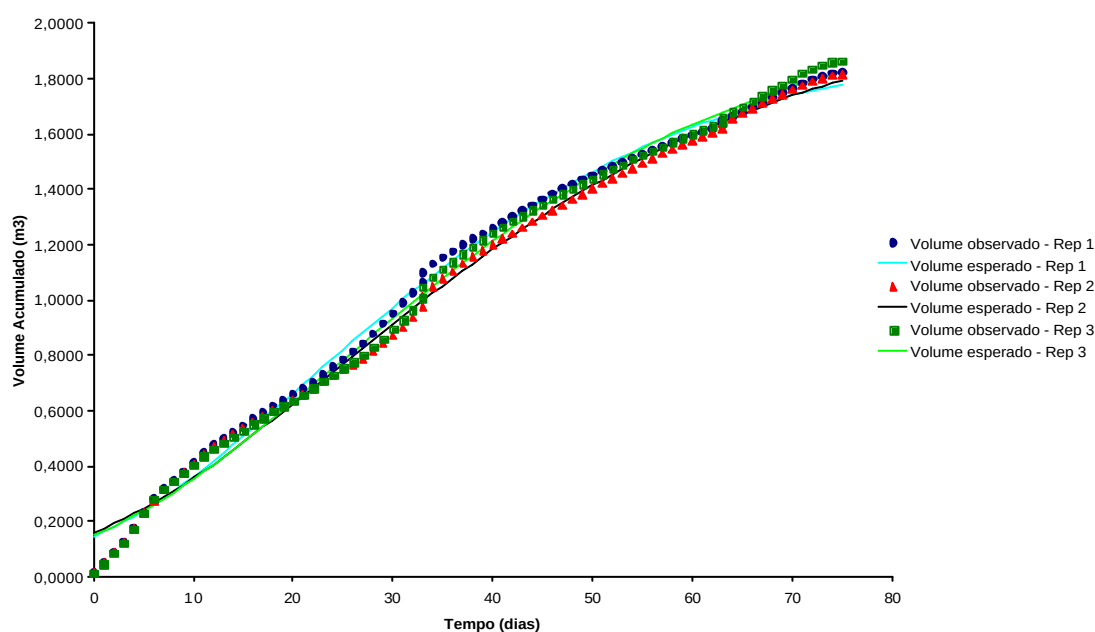


Figura 43 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 3.

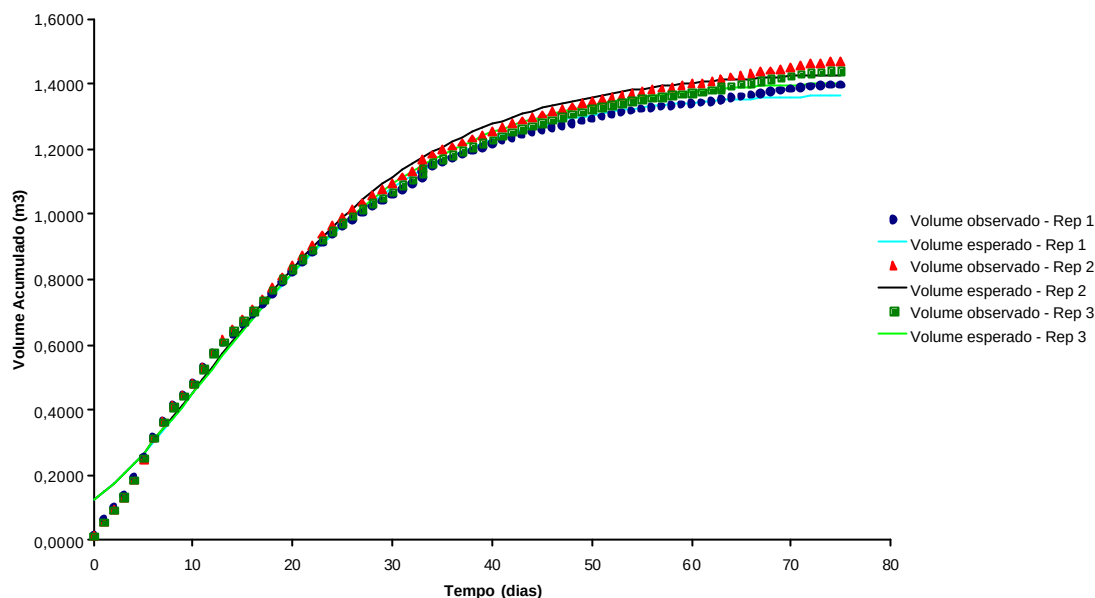


Figura 44 – Modelo ajustado para o volume acumulado de biogás (m^3), em função do tempo (dias), para o terceiro ciclo. Com as três repetições do tratamento 4.

4.1.3.2. Estudo das propriedades dos Estimadores dos Parâmetros do Modelo

A seguir, pela Tabela 31, mostraremos o teste de normalidade da distribuição amostrais dos estimadores de α_1 , β_1 e γ_1 do modelo, segundo os três tratamentos.

Tabela 31 – Teste de normalidade da distribuição amostral dos estimadores de α_1 , β_1 e γ_1 .

Ciclo	Trat	Distribuição Amostral		
		$\hat{\alpha}_1$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\gamma}_1$
3	2	0,0233	0,5411	0,9788
3	3	0,0003	0,9453	0,4992
3	4	0,6075	0,2402	0,5169

Lembrando-se que pelo teste, se o nível descritivo for menor que 0,05 os dados não seguem uma distribuição normal. Observando os estimadores β_1 e γ_1 , de todos tratamentos, mostrou-se que seguiram uma distribuição normal. O estimador de a_1 foi o único com problema de seguir distribuição normal, fato evidenciado nos tratamentos 2 e 3. Assim usou-se a análise de variância não-paramétrica para todo o estudo do modelo.

As Figuras a seguir mostram a distribuição amostral dos estimadores, segundo os três tratamentos.

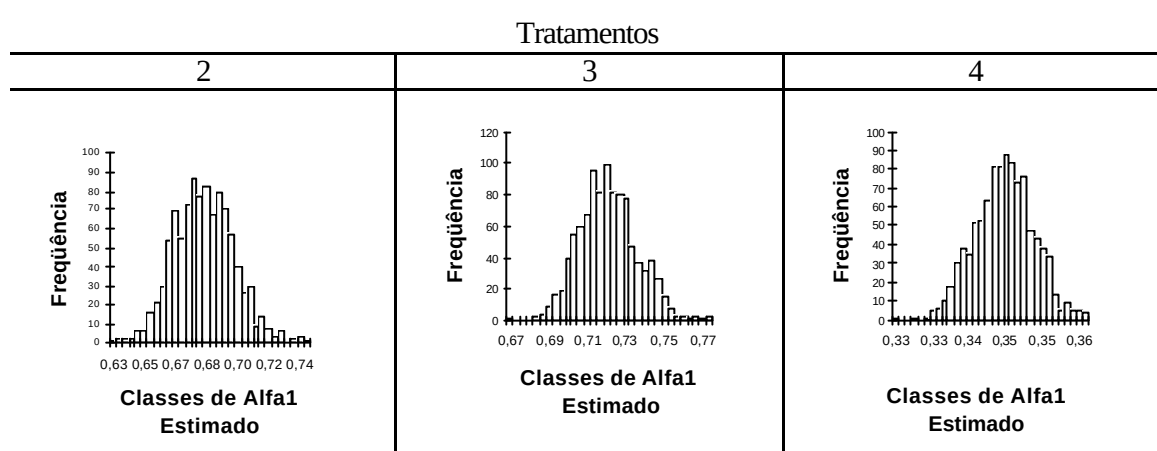


Figura 45 – Distribuição amostral do estimador $\hat{a}_1$, por tratamento.

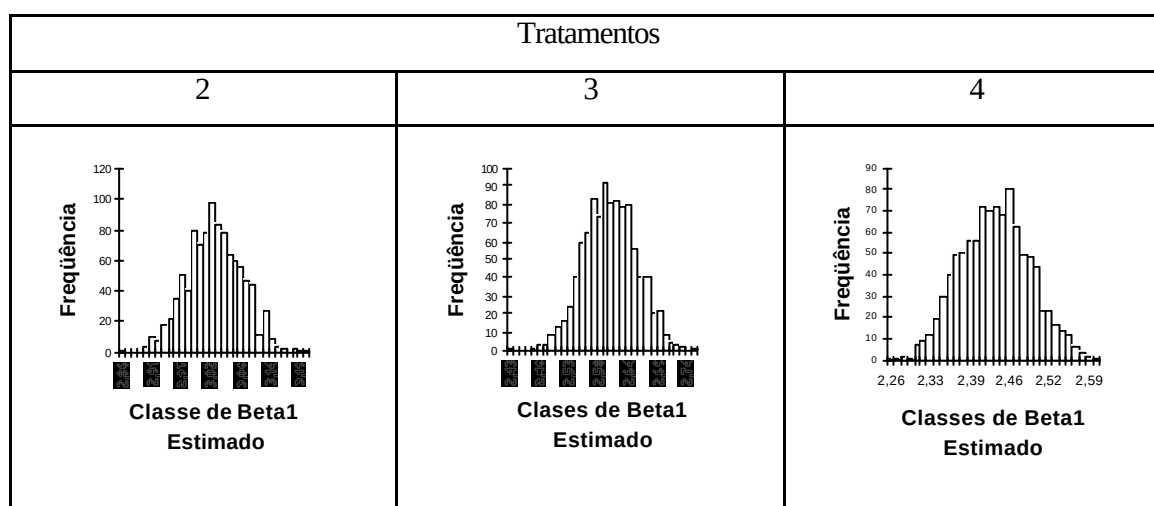


Figura 46 – Distribuição amostral do estimador $\hat{b}_1$, por tratamento.

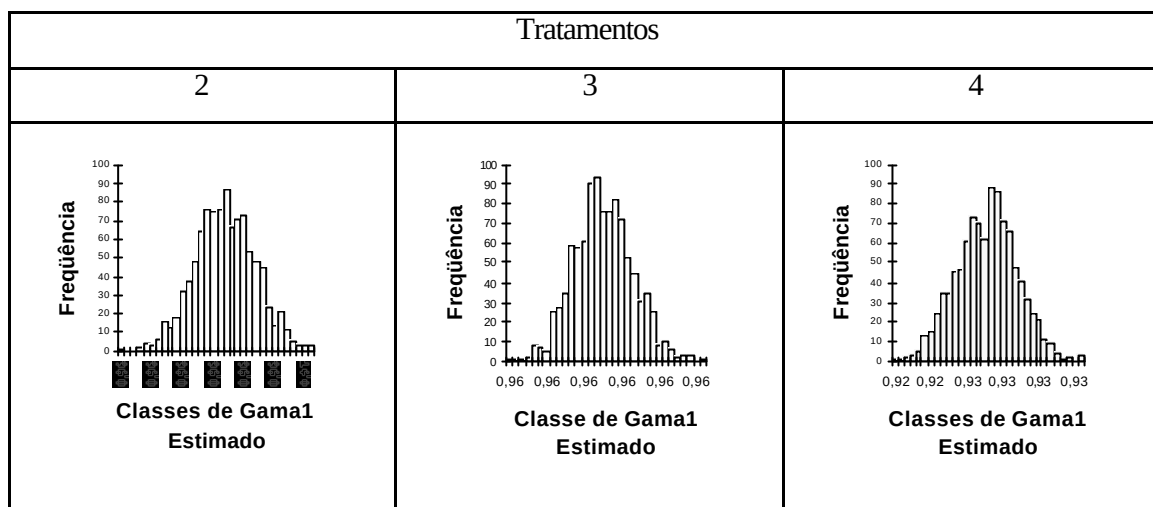


Figura 47 – Distribuição amostral do estimador $\hat{g}_1$, por tratamento.

4.1.3.3. Testes Estatísticos

Os resultados dos testes de comparação entre os parâmetros estimados

$\hat{a}_1$, $\hat{b}_1$ e $\hat{g}_1$ para os tratamentos estão apresentados na Tabelas abaixo.

Tabela 32 – Comparação entre Alfas_1 , testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,685 a ⁽¹⁾
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,736 a
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	a,348 b

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=5,956$ ($P=0,025$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Através dos resultados apresentados na Tabela 32, observa-se que os tratamentos 2 e 3 não diferem entre si, mas diferiram com o tratamento 4. Assim, pelos resultados obtidos, observou-se também que existe diferenças na velocidade de produção de biogás entre o tratamento 4 com os demais.

Tabela 33 – Comparação entre $Betas_1$, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo (a = 5% de significância).

Tratamentos	Mediana
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	3,027 a ⁽¹⁾
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	2,603 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	2,414 c

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=7,200$ ($P=0,004$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

A Tabela 33 mostra que os três tratamentos, diferem entre si, ou seja, as porcentagens de inóculos afetaram o processo de produção de biogás, em todos tratamentos.

Tabela 34 – Comparação entre $Gamas_1$, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo (a = 5% de significância).

Tratamentos	Mediana
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	0,961 a ⁽¹⁾
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	0,962 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	0,928 a

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=5,600$ ($P=0,050$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

Pelos resultados apresentados pela Tabela 34, observa-se a estimativa de μ_1 com os tratamentos 2 e 3 diferem entre si. O tratamento 4 difere apenas com o tratamento 3. Também mostrou-se pelos dados obtidos que o crescimento da produção de biogás do tratamento 3 diferiu dos demais, resultando em maior produção de biogás.

4.1.3.4. Sólidos Totais e Voláteis

As reduções nos teores de sólidos voláteis, apresentados na Tabela 35 mostram que o período de fermentação de 77 dias para todos os tratamentos. Permitiu valores próximos (47 % em média) para o tratamento 4. Os demais tratamentos 2 e 3, tiveram um desempenho inferior na redução de sólidos voláteis (35% e 40% em média, respectivamente). Também, as diferenças de reduções, podem ser explicadas pela quantidade de inóculo adicionada nos três tratamentos. Os três tratamentos obtiveram bons resultados na redução de sólidos voláteis.

Tabela 35 – Teores de sólidos totais (ST) e voláteis (SV), em % e em massa e redução de sólidos voláteis (SV), em %.

Trat	Entrada				Saída				Red. de SV
	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	ST (%)	ST (kg)	SV (%)	SV (kg)	
2	7,68	4,610	6,44	3,861	5,14	3,087	4,14	2,486	35.51
3	7,34	4,404	6,14	3,684	4,70	2,821	3,69	2,215	39.86
4	7,63	4,579	6,27	3,759	4,47	2,687	3,31	1,987	47.14

Os resultados das reduções de sólidos totais, em %, influenciados pelo fator tempo de redução hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, estimados pelo teste Kruskal-Wallis para os três tratamentos, representadas pela mediana: $H = 3,822$ ($P=0,168$). Mostraram que as reduções de sólidos totais nos três tratamentos não diferem entre si, ou seja, não existe diferença significativa entre os tratamentos, a 5% de significância.

Na Tabela 36, estão apresentados os resultados das reduções de sólidos voláteis, em %, para os três tratamentos nos efeitos da variação da quantidade de estrume, água e inóculo e tempo de retenção hidráulica (TRH).

Tabela 36 – Comparação das reduções de sólidos voláteis, em %, influenciados pelo fator tempo de retenção hidráulica (TRH) e variação da quantidade de estrume, água e inóculo, testados pelo teste Kruskal-Wallis e teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls (SNK) para os tratamentos, no terceiro ciclo ($\alpha = 5\%$ de significância).

Tratamentos	Mediana
2-Estrume 22(kg) +Água 26 (kg) Inóculo 12 (kg)	3,570 a ⁽¹⁾
3-Estrume 20(kg) +Água 22 (kg) Inóculo 18 (kg)	4,850 b
4-Estrume 18(kg) +Água 18 (kg) Inóculo 24 (kg)	8,620 b

Resultados do teste Kruskal-Wallis: $H=6,489$ ($P=0,011$)⁽²⁾.

⁽¹⁾ Medianas seguidas de mesma letra, não diferem significativamente a 5% de significância pelo teste de Student-Newman-Keuls.

As análises apresentadas na Tabela 36 indicam que houve diferença significativa entre o tratamento 4 com os demais tratamentos. Também mostrando que a quantidade de inóculo adicionada em cada tratamento afeta nas reduções médias de sólidos voláteis.

4.1.3.5. Curva Mediana e Intervalo de Confiança Empírico

Uma outra maneira de obter comparações entre os tratamentos é pela curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico. Assim, foi feita essa análise para os todos os tratamentos, do terceiro ciclo.

As Figuras apresentadas a seguir foram obtidas por simulação a partir da geração de 1000 amostras aleatórias, referentes ao terceiro ciclo.

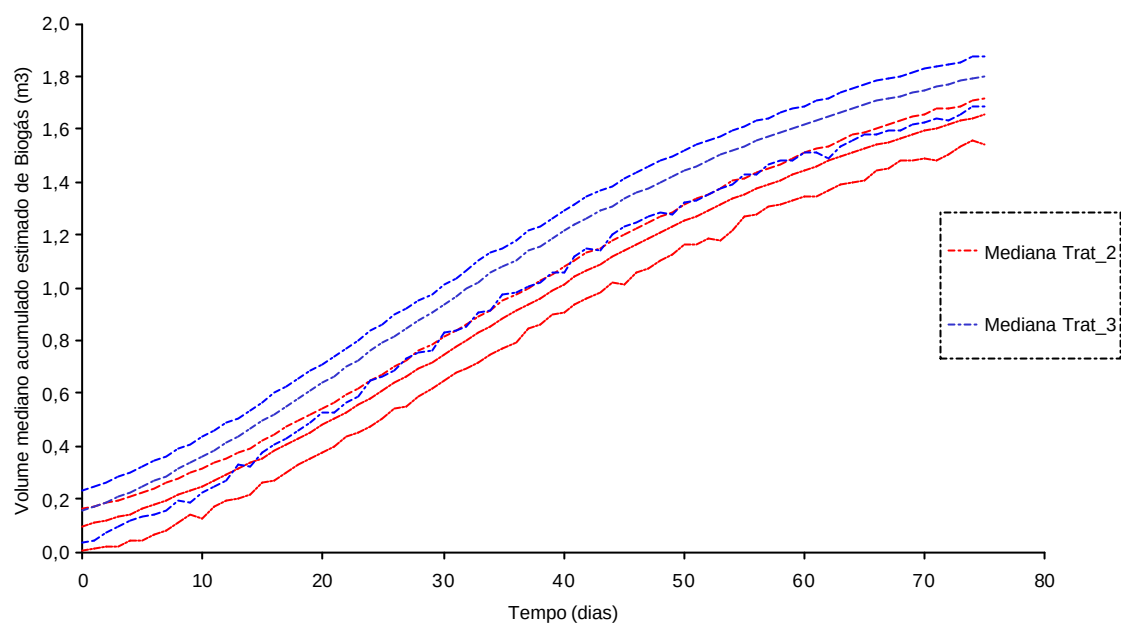


Figura 48 – Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 2 e 3 do terceiro ciclo.

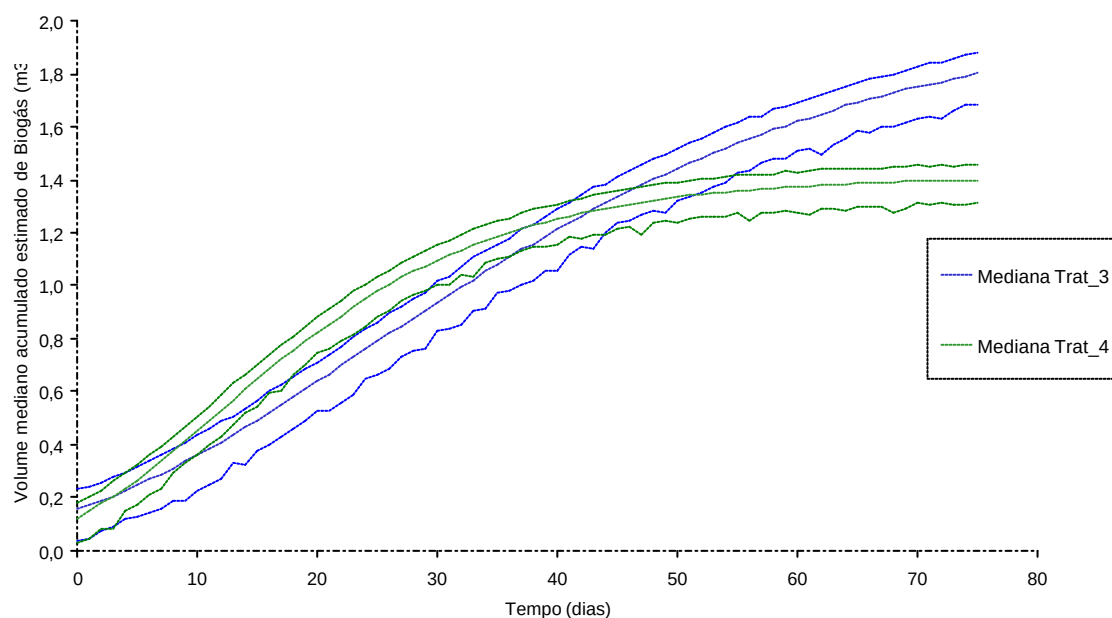


Figura 49 – Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 3 e 4 do terceiro ciclo.

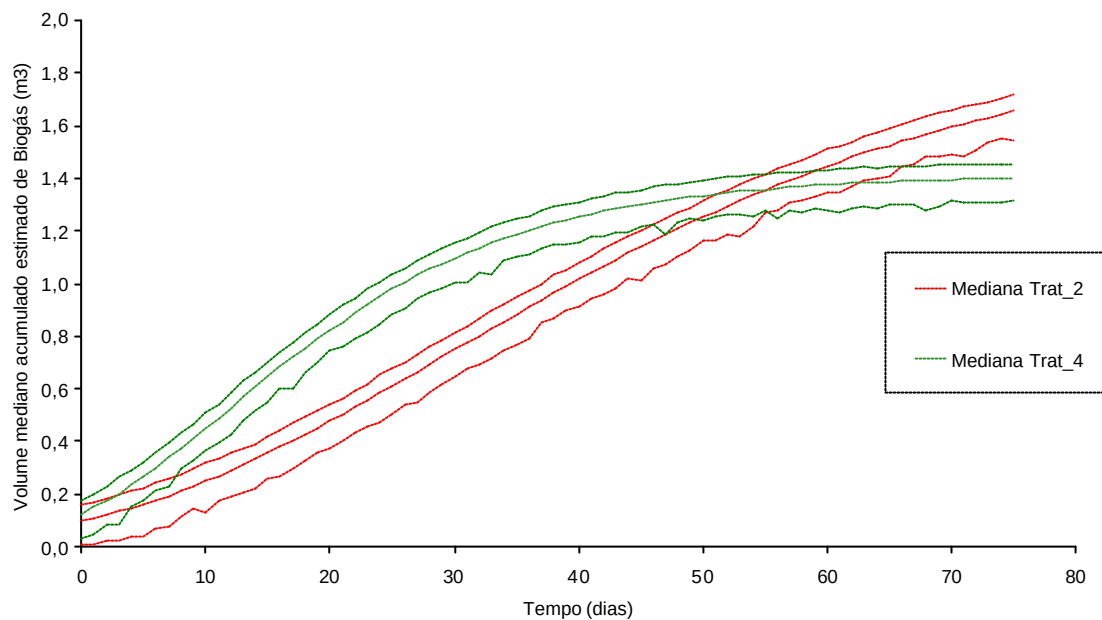


Figura 50 – Curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, dos tratamentos 2 e 4 do terceiro ciclo.

Observou-se por estas Figuras anteriores que os três tratamentos diferem entre si, isto é, a quantidade de estrume, água e inóculo adicionada em cada tratamento afetaram o volume de produção de biogás.

5 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados do desenvolvimento deste trabalho, pôde-se chegar às seguintes conclusões:

- ♦ O sistema de biodigestão anaeróbia, montado em área experimental, para estudo do efeito de adicionamento de inóculo e Tempo de Retenção Hidráulica, sobre a produção de biogás a partir de dejetos de bovinos em fase de determinação, foi eficiente, pois permitiu a condução do experimento com coeficientes de variação satisfatórios para os parâmetros analisados;
- ♦ As quantidades adicionadas de inóculo nos tratamentos 2, 3 e 4 dos três ciclos, forneceram a partida dos biodigestores, pois resultaram em maior produção acumulada de biogás, em menor tempo, quando comparadas com o tratamento 1 do primeiro ciclo;
- ♦ A aproximação de uma Gompertz para o volume de biogás, para os tratamentos 4 do segundo ciclo e 2, 3 e 4 do terceiro mostrou-se adequada em todas situações experimentais, permitindo estimar os parâmetros biológicos envolvidos no modelo;

- ♦ Evidenciou-se também uma adequada aproximação do modelo com mistura de Exponencial com Gompertz para o volume de biogás, para todos os tratamentos do primeiro ciclo e, tratamentos 2 e 3 do segundo ciclo;
- ♦ Pôde-se mostrar, através das curvas de velocidades instantâneas, que todo o tratamentos 4, dos três ciclos, obtiveram maiores velocidades de produção de biogás;
- ♦ Pôde-se mostrar, através de simulação, as propriedades dos estimadores dos parâmetros do modelo Gompertz e mistura de Gompertz com Exponencial;
- ♦ Através da curva mediana e intervalo de 95% de confiança empírico, obtido por simulação, pôde-se mostrar que os três tratamentos do terceiro ciclo diferem entre si.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: Técnicas lineares e Não-Lineares a Sistemas Reais.** Belo Horizonte, 2000. Ed. UFMG. 554p.

ANDERSON, D. H. **Compartmental modeling and tracer kinetics.** Dallas: Spring-Verlag, 1983. 301p.

ASAE Standard: **ASAE engineering practice: ASAE EP393.2. Manure storages.** 1994. p.555 – 558.

BARBOSA, F. H. F. **Microbiologia 2000.** Acesso disponível em:
http://www.microbiologia2000.hpg.ig.com.br/ciencia_e_educacao/7/index_pri_1.html
Acesso em: 17 de dez. 2002

BARCELLOS, L. A. R. **Avaliação do potencial fertilizante do esterco líquido de bovinos.** Santa Maria, 1991. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria.

BARRERA, P. **Biodigestores – energia, fertilidade e saneamento para a zona rural.** São Paulo: Cone, 1993. 106p.

BASSANEZI, R. C., FERREIRA Jr., W. C. **Equações diferenciais com aplicações.** São Paulo: Harbra, 1988. 572p.

BENINCASA, M., ORTOLANI, A. F., LUCAS Jr, J. **Biodigestores convencionais?** Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP, 1991. 25p (Boletim Técnico, 8).

BENINCASA, M., ORTOLANI, A. F., LUCAS Jr, J. **Biodigestores rurais modelo indiano, chinês e batelada.** Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP, 1991. 34p (Boletim Técnico, 8).

BIGERIEGO, M., DELGADO, M., CARBONELL, V. **Aplicacion de lãs tecnologias de fermentacion anaeróbia y otros procesos complementarios em la depuracion de efluentes de origen ganadero.** Madrid, 1997. 89p.

BIOTEC. Disponível em <http://www.ecoltec.com.br> . Acesso em 25 out. 2002.

CAETANO, L. **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás.** 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em agronomia – Área de Concentração Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP, 1985.

CAMPOS, A. T. **Análise da viabilidade da reciclagem de dejetos de bovinos com tratamento biológico, em sistema intensivo de produção de leite.** 1997. 141p. Tese (Doutorado em agronomia – Área de Concentração Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores aeróbios: princípios do tratamento biológico de águas residuárias.** Belo Horizonte, 1997. v5. 246p.

CARVALHO, S. M. R. **Análise de componentes principais e análise de agrupamento na avaliação do desempenho de biodigestores “batelada” e “contínuos” (modelo indiano) operados com estrume de suínos.** Botucatu, 1994. 79p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

CIÊNCIA RURAL. **Revista Científica. Santa Maria.** Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Maria, v. 26, n. 2 mai/ago 1996.

CONAMA (**Art. 1º da Resolução 001/86 do CONAMA**). Estudo prévio de impacto ambiental (EIA). Disponível em <http://www.unisantos.br>. Acesso em 10 out. 2002.

CURTIS, S.E. **Environmental management in animal agriculture.** Ames, The Iowa State University Press, 1983. 409 p.

DEBUSK, A .G. **Genética molecular.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1971. 166 p.

EMBRAPA. **Monitoramento por satélite.** Disponível em <http://www.ecpF.org.br/Projetos/cmp/impacto.html>. Acesso em 10 out. 2002.

FERRAZ, J. M. G., MARRIEL, I. E. **Biogás: fonte alternativa de energia.** Sete Lagoas, 1980. CNPMS. 27p.

HARDOIM, P. C. LUCAS JUNIOR, J. Efeito da Temperatura e da Agitação na Produção de Biogás na Fase de Partida de Biodigestor Anaeróbio Operados com Estrume de Bovinos. 1997. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. **Anais...**1997, p. 394 a 396.

HERSKOWITZ, I. H. **Princípios básicos de genética molecular.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1971. 339 p.

IBAMA. Disponível em <http://www.ibama.gov.br>. Acesso em 05 nov. 2002.

LUCAS JÚNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** 1994. 137p. Tese (Livre-Docência) – faculdade de ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal – SP, 1994.

LUCAS JR., J. & SILVA, F.M. Aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de energia. Simpósio – Energia, Automação e Instrumentação: **XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA.** Poços de Caldas/MG. 1998. P63-67.

LUCAS JÚNIOR, J.; GALBIATTI, J. A.; ORTOLANI, A. F. Produção de biogás a partir de estrume de ruminates e monogástricos com e sem inóculo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16, 1987, Jundiaí. **Resumos...** Jundiaí: DEA/IA/SBEA, 1987. P.65.

MAGÃLHÃES, A.P.T. **Biogás – um projeto de saneamento urbano.** São Paulo: Nobel, 1986. 120p.

MARTINHÃO, N. **Dinâmica populacional e exploração de recursos renováveis.** Londrina, 1981. 116p. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Estadual de Londrina.

MERKEL, J.A. **Managing livestock wastes**. AVI Publishing Co, Inc., Westport, Connecticut. 1981. 419p.

MOFFITT, D. Waste management and recycling of organic matter. In: CIGR Handbook of agricultural engineering. **Animal Production and Aquacultural Engineering**. St Joseph. MI. USA: ASAE, v.2, p. 163-196, 1999.

MORSE, d. et al. **Production and characteristics of manure from lactating dairy cows in florida**. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.), v.37, n.1. p.275-9, 1994.

NOGUEIRA, L. A .H. **Biodigestão – a alternativa energética**. São Paulo: Nobel, 1986. 93p.

OSAVA, Mário. Disponível em <http://www.tierramerica.net/2000/1126/pacentos.html> . Acesso em 06 nov. 2002.

PROJETO BIOGÁS. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. UNESP. 33p.

QUEIROZ, S. C. **Função Gompertz aplicada à modelagem de produção do biogás em biodigestor tipo batelada**. 2001. 64p. Dissertação (Mestrado em agronomia – Área de Concentração Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu/SP, 2001.

RATKOWSKY, D. A. **Nonlinear regression modeling**. New York: Marcel Dekker, Inc.,1983.276p.

SANTOS, T. M. B. **Caracterização química, microbiológica e potencial de produção de biogás a partir de três tipos de cama, considerando dois ciclos de criação de frangos de**

corte. Jaboticabal, 1997. 79p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

SANTOS, T. M. B, LUCAS JR., J. Produção de Biogás a Partir de Três Tipos de Cama Obtidos em Dois Ciclos de Criação de Frangos de Corte, **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.17, p.9-20, 1997.

SEIXAS, J. FOLLE, S., MACHETTI, D. **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília, 1980. EMBRAPA – 1980. 60p.

SILVA, P. R.. **Lagoas de estabilização para tratamento de resíduos de suínos.** São Carlos, 1973. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SOUZA, C. F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos:** Obtenção de Dados Aplicados no Desenvolvimento de um Modelo Dinâmico de Simulação da Produção de Biogás. Jaboticabal, 2001. 140p. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista

TCHOBANOGLOUS, G. **Wastewater engineering: treatment disposal reuse.** 2.ed. Davis: McGraw-Hill, 1979, 920p.

THOMAS , M. V., NORDSTEDT, R. A. **Generic anaerobic difestation model for the simulation of various reactor types and substrates.** American Society of Agricultural Engineers, v. 36(2), March-April, p.537-544, 1993.

TORNERO, M. T. T. **Utilização de modelos assintóticos-sigmóides de crescimento multifásico com sazonalidade em estudos zootécnicos.** Botucatu, 1996. Tese (Doutorado em Zootecnia/Nutrição e Produção Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista.

APÊNDICE

1- Modelos de regressão

```

/* ----- Batelada tratamento -----
----- */
options nocenter;
/* proc sort data=simone.batelada;by ciclo trat dias; */
/* == Ajusta modelos de Gompertz - grupo a ===== */
/* == Ajusta modelos de misturas sigmóides invertidas-grupo b
===== */
/*
data simone.grupo_a;set simone.batelam;
  if ciclo=2 and trat=4 then output;
  if ciclo=3 then output;
data simone.grupo_b;set simone.batelam;
  if ciclo=1 then output;
  if ciclo=2 then do;
    if trat=2 or trat=3 then output;
  end;
*/
title '===== Mistura de Gompertz por trat =====';
proc sort data=simone.grupo_a;
  by ciclo trat;
proc sort data=simone.grupo_b;
  by ciclo trat;
title '===== GRUPO a =====';
proc nlin data=simone.grupo_a method=marquardt maxiter=5000
noitprint;
  by ciclo trat;
  parms
  alfa1=2 beta1=0.5 gama1=0.9;
  model volac_m=exp(alfa1-beta1*(gama1**dias));
  output out=grupo_a parms=parms=alfa1 beta1 gama1 p=pred r=res
sse=sse;
run;
title '===== GRUPO b =====';
proc nlin data=simone.grupo_b method=marquardt maxiter=5000
noitprint;
  by ciclo trat;
  parms
  alfa1=2 beta1=3 gama1=1 alfa2=0.8 beta2=0.8 gama2=1;
  model volac_m=alfa1-beta1*(gama1**dias)-exp(alfa2-
beta2*(gama2**dias));
  output out=grupo_b parms=parms=alfa1 beta1 gama1 alfa2 beta2
gama2 p=pred r=res sse=sse;
run;
data simone.parm_ga(keep=ciclo trat alfa1 beta1 gama1 sse);
  set grupo_a;
  by ciclo trat;
  if first.trat then output;else delete;

```

```

data simone.parm_gb(keep=ciclo trat alfa1 beta1 gama1 alfa2
beta2 gama2 sse);
  set grupo_b;
  by ciclo trat;
  if first.trat then output;else delete;
proc univariate data=simone.grupo_a noprint;
  by ciclo trat;
  var volac_m;
  output out= cssn_a css=cssa n=na;
proc univariate data=simone.grupo_b noprint;
  by ciclo trat;
  var volac_m;
  output out= cssn_b css=cssb n=nb;
data simone.parm_ga(keep=ciclo trat alfa1 beta1 gama1 sse g1
cssa mse r2 inflex);
  merge simone.parm_gb cssn_a;
  by ciclo trat;
  g1=na-3; mse=sse/g1; r2=(1-sse/cssa)*100;
  inflex=log(1/beta1)/log(gama1);
  format mse 8.6 r2 5.2 alfa1 beta1 gama1 8.4;
data simone.parm_gb(keep=ciclo trat alfa1 beta1 gama1 alfa2
beta2 gama2 sse g1 cssb mse r2);
  merge simone.parm_gb cssn_b;
  by ciclo trat;
  g1=nb-6; mse=sse/g1; r2=(1-sse/cssb)*100;
  format mse 8.6 r2 5.2 alfa1 beta1 gama1 alfa2 beta2 gama2 8.4;
data simone.grupoab;
  set simone.parm_ga simone.parm_gb;
proc sort data=simone.grupoab;by ciclo trat;
title '***** Grupo a e b';
proc print data=simone.grupoab;run;
/* ---- arquivos para simulação ---- */
data simone.grupo_ax (keep=ciclo trat volac_m dias alfa1 beta1
gama1 mse);
  merge simone.grupo_a simone.parm_ga;
  by ciclo trat;
data simone.grupo_bx(keep=ciclo trat volac_m dias alfa1 beta1
gama1
                        alfa2 beta2 gama2 mse);
  merge simone.grupo_b simone.parm_gb;
  by ciclo trat;

RUN;

```

2- Modelos de regressão

```

/* ----- Batelada tratamento repetição -----
----- */
options nocenter;
proc sort data=simone.batelada;by ciclo trat repete;
/* == Ajusta modelos de Gompertz - grupo a =====*/
/* == Ajusta modelos de misturas sigmóides invertidas-grupo b
=====*/
data simone.gr_ar;
  set simone.batelada;
  if ciclo=2 and trat=4 then output;
  if ciclo=3 then output;
data simone.gr_br;set simone.batelada;
  if ciclo=1 then output;
  if ciclo=2 then do;
    if trat=2 or trat=3 then output;
  end;
title '===== Mistura de Gompertz por trat rep
=====';
proc sort data=simone.gr_ar;
by ciclo trat repete;
proc sort data=simone.gr_br;
by ciclo trat repete;
title '===== GRUPO a =====';
proc nlin data=simone.gr_ar method=marquardt maxiter=5000
noitprint;
by ciclo trat repete;
  parms
  alfa1=2 beta1=0.5 gama1=0.9;
  model vol_acm=exp(alfa1-beta1*(gama1**dias));
  output out=gr_ar
  parms=parms=alfa1 beta1 gama1 p=pred r=res sse=sse;
run;
title '===== GRUPO b =====';
proc nlin data=simone.gr_br method=marquardt maxiter=5000
noitprint;
by ciclo trat repete;
  parms
  alfa1=2 beta1=3 gama1=1 alfa2=0.8 beta2=0.8 gama2=1;
  model vol_acm=alfa1-beta1*(gama1**dias)-
    exp(alfa2-beta2*(gama2**dias));
  output out=gr_br
    parms=parms=alfa1 beta1 gama1 alfa2 beta2 gama2 p=pred
r=res sse=sse;
run;
data simone.parm_gar(keep=ciclo trat repete alfa1 beta1 gama1
sse);
  set gr_ar;
  by ciclo trat repete;
  if first.repete then output;else delete;

```

```

data simone.parm_gbr(keep=ciclo trat repete alfa1 beta1 gama1
alfa2
                    beta2 gama2 sse);
  set gr_br;
  by ciclo trat repete;
  if first.repete then output;else delete;

/* ==== */
proc means data=simone.gr_ar noprint;
  by ciclo trat repete;
  var vol_acm;
  output out= cssn_a css=cssa n=na;
proc means data=simone.gr_br noprint;
  by ciclo trat repete;
  var vol_acm;
  output out= cssn_b css=cssb n=nb;
data simone.parm_gar(keep=ciclo trat repete alfa1 beta1 gama1
sse gl cssa mse r2 inflex);
  merge simone.parm_gar cssn_a;
  by ciclo trat repete;
  gl=na-3; mse=sse/gl; r2=(1-sse/cssa)*100;
  inflex=log(1/beta1)/log(gama1);
  format mse 8.6 r2 5.2 alfa1 beta1 gama1 8.4;
data simone.parm_gbr(keep=ciclo trat repete alfa1 beta1 gama1
alfa2 beta2 gama2 sse gl cssb mse r2);
  merge simone.parm_gbr cssn_b;
  by ciclo trat repete;
  gl=nb-6; mse=sse/gl; r2=(1-sse/cssb)*100;
  format mse 8.6 r2 5.2 alfa1 beta1 gama1 alfa2 beta2 gama2 8.4;

/* ==== */
data simone.gr_abr;
  set simone.parm_gar simone.parm_gbr;
proc sort data=simone.gr_abr;
  by ciclo trat repete;
title '***** Grupo a e b';
proc print data=simone.gr_abr;run;
/* ---- arquivos para simulação ---- */
data simone.grupo_ar (keep=ciclo trat repete volac_m dias alfa1
beta1 gama1 mse);
  merge simone.gr_ar simone.parm_gar;
  by ciclo trat;
data simone.grupo_br(keep=ciclo trat repete volac_m dias alfa1
beta1 gama1
                    alfa2 beta2 gama2 mse);
  merge simone.gr_br simone.parm_gbr;
  by ciclo trat;

RUN;

```

3- Distribuição amostral dos estimadores (grupo A)

```

/* ----- Distribuição Amostral dos Estimadores_Grupo A ---
-----*/
options ls=255 nocenter;

/*
=====
= */
%MACRO ATUALIZA(datset);
  data &datset;
  set &datset;
  proc append out=simone.&datset new=&datset;
  run;
%MEND ATUALIZA;
/*
=====
= */

/*
=====
= */
%MACRO GOMPERTZ(datset);
proc sort data=&datset;
  by ciclo trat repsim;
run;
proc nlin data=&datset method=marquardt maxiter=1000 noitprint
noprnt;
  by ciclo trat repsim;
  parms alfale=2 betale=0.5 gamale=0.9;
  model vol_sim=exp(alfale-betale*(gamale**dias));
  output out=grupo_a
  parms=parms=alfale betale gamale p=pred r=res sse=sse;
run;
data simone.parsim_a(keep=ciclo trat alfale betale gamale);
  set grupo_a;
  by ciclo trat repsim;
  if first.repsim then output;

/* DM 'LOG;CLEAR'; */
%MEND GOMPERTZ;
/*
=====
*/
/* == P R I N C I P A L
===== */
/* ==MODELO GOMPERTZ=====
*/
/* =====
*/
/* =====
*/

```

```

data simula (keep=ciclo trat repsim dias vol_sim);
  set simone.grupo_ax;
  by ciclo trat;
  do repsim=1 to 1000;
    ei=sqrt(mse)*rannor(repsim+234572);
    vol_sim=exp(alfa1-beta1*(gama1**(dias)))+ei;
    output;
  end;

%GOMPERTZ(simula);
proc univariate data=simone.parsim_a noprint;
  by ciclo trat;
  var alfale betale gamale;
  output out=simone.normal_a
         probn=pr_alfa1 pr_beta1 pr_gama1;
run;

proc print data=simone.normal_a;
  title 'Teste de Normalidade dos estimadores alfa1 beta1 gama1 -
  Grupo a';
run;

```

4- Distribuição amostral dos estimadores (grupo B)

```

/* ----- Distribuição Amostral dos Estimadores_Grupo B ---
-----*/
options ls=255 nocenter;
/*
=====
= */
%MACRO ATUALIZA(datset);
  data &datset;
  set &datset;
  proc append out=simone.&datset new=&datset;
  run;0
%MEND ATUALIZA;
/*
=====
= */
/*
=====
= */
%MACRO GOMPERTZ(datset);
proc sort data=&datset;
  by ciclo trat repsim;
run;
proc nlin data=&datset method=marquardt maxiter=1000 noitprint
noprint;
  by ciclo trat repsim;
  parms alfa1e=2 beta1e=3 gama1e=1 alfa2e=0.8 beta2e=0.8
gama2e=1;
  model vol_sim=alfa1e-beta1e*(gama1e**dias)-exp(alfa2e-beta2e*
(gama2e**dias));
  output out=grupo_b
  parms=parms=alfa1e beta1e gama1e alfa2e beta2e gama2e p=pred
r=res sse=sse;
run;
data simone.parsim_b(keep=ciclo trat alfa1e beta1e gama1e
alfa2e beta2e gama2e);
  set grupo_b;
  by ciclo trat repsim;
  if first.repsim then output;

/* DM 'LOG;CLEAR'; */
%MEND GOMPERTZ;
/*
=====
*/
/* == P R I N C I P A L
===== */
/* ==MODELO GOMPERTZ=====
*/
/* =====
*/

```

```

/* =====
*/
data simula (keep=ciclo trat repsim dias ei vol_sim);
  set simone.grupo_bx;
  by ciclo trat;
  do repsim=1 to 10;
    ei=sqrt(mse)*rannor(repsim+234);
    vol_sim=alfa1-beta1*(gama1**dias)-exp(alfa2-
beta2*(gama2**dias))+ei;
    output;
  end;
proc print data=simula;
run;
/* %GOMPERTZ(simula);
proc univariate data=simone.parsim_b noprint;
  by ciclo trat;
  var alfa1e beta1e gama1e alfa2e beta2e gama2e;
  output out=simone.normal_b
         probn=pr_alfa1 pr_beta1 pr_gama1
               pr_alfa2 pr_beta2 pr_gama2;
run;
proc print data=simone.normal_b;
  title 'Teste de Normalidade dos estimadores a1 b1 g1 a2 b2 g2
- Grupo b';
run;
*/
RUN;

```


5- Intervalo de confiança (grupo A)

```

/* ----- Envelope de Confiança_Grupo_a-----
-----*/
proc sort data=simone.simul_ga;
  by ciclo trat dias;
run;

proc univariate data=simone.simul_ga noprint;
  by ciclo trat dias;
  var vol_sim;
  output out=simone.cobert_a mean=media
         PCTLPRE = P
         PCTLPTS = 0.025 50.00 97.50
         PCTLNAME = CT_0025 CT_050 CT_0975;
run;

RUN;

```