

UTILIZAÇÃO DE SORO DE QUEIJO NA DIGESTÃO ANAERÓBICA

TAIS HELENA MARTINS LACERDA

Química Industrial

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção de Título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Tecnologia de Alimentos.

PIRACICABA

ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL

DEZEMBRO/1987

L131u

Lacerda, Tais Helena Martins

Utilização do soro de queijo na digestão anaeróbica. Piracicaba, 1988.

85 p.

Diss. (Mestre) - ESALQ

Bibliografia.

1. Digestão anaeróbica 2. Queijo - Subproduto 3. Soro de queijo - Uso I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz", Piracicaba.

CDD 637.34

UTILIZAÇÃO DE SORO DE QUEIJO NA DIGESTÃO ANAERÓBICA

TAIS HELENA MARTINS LACERDA


Aprovado em 08/02/1988.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Antonio Joaquim de Oliveira - ESALQ/USP

Prof. Dr. Luiz Carlos Basso - ESALQ/USP

Prof. Dr. João Gustavo Brasil Caruso - ESALQ/USP


Prof. Dr. Antonio Joaquim de Oliveira

- Orientador -

Aos meus pais

OFEREÇO

Ao meus sobrinhos e irmãos

DEDICO

Ao Prof. Dr. Antonio Joaquim de Oliveira

Ao Prof. Dr. João Gustavo Brasil Caruso

Ao Prof. Ms. Cláudio Rosa Gallo

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto Cantarelli

Aos Engenheiros Agrônomos José Marcos Gryscek e Franklin Rosa Belo

À Drª Rosana Novaes

À Secretária Sandra de Marchi

Às Técnicas Cleomar M. Carvalho, Ivani Moreno e Ana Maria Zani Moura

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos da E.S.A. "Luiz de Queiroz" - USP

À BRASMETANO, Tecnologia Integradas

Ao Departamento de Tecnologia Rural da E.S.A. "Luiz de Queiroz" - USP

À CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

SINCEROS AGRADECIMENTOS

ÍNDICE

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
RESUMO.....	vii
SUMMARY.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Generalidades.....	8
2.2. Etapas da Biossíntese de Metano.....	11
2.3. Parâmetros que Afetam a Digestão Anaeróbica.....	14
2.4. Tipos de Biodigestores.....	17
2.4.1. Concepção convencional.....	18
2.4.2. Concepção não-convencional.....	19
2.4.2.1. Filtros anaeróbicos.....	20
2.4.2.2. Biodigestores de contato.....	21
2.4.2.3. Biodigestor de fluxo ascendente.....	21
2.5. Digestão Anaeróbica do Soro de Queijo.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. Materiais.....	30
3.1.1. Biodigestores.....	30
3.1.2. Inóculo.....	31
3.1.3. Substrato.....	31
3.2. Métodos.....	32
3.2.1. Condições gerais do experimento.....	32

	Página
3.2.2. Condução do experimento.....	34
3.2.2.1. Aclimação do inóculo.....	34
3.2.2.2. Operação normal dos biodigestores.....	34
3.2.3. Parâmetros para acompanhar e avaliar o processo da digestão anaeróbica.....	35
3.2.3.1. pH.....	36
3.2.3.2. Volume de gases produzidos.....	36
3.2.3.3. Composição de gases.....	36
3.2.3.4. Ácidos voláteis.....	37
3.2.3.5. Alcalinidade.....	37
3.2.3.6. Demanda química de oxigênio (DQO).....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1. Variação do pH, Acidez Volátil e Alcalinidade da Dige- stão Anaeróbica do Soro de Queijo Com e Sem Correção de pH.....	41
4.1.1. Biodigestores alimentados com soro sem correção de pH (1 e 2).....	41
4.1.2. Biodigestores alimentados com soro com pH corrigi- do a 5,5 (3 e 4).....	45
4.1.3. Biodigestores alimentados com soro com pH corrigi- do a 6,5 (5 e 6).....	49
4.2. Eficiência da Digestão Anaeróbica do Soro de Queijo em Relação à Remoção de DQO e Produção de Biogás.....	53
5. CONCLUSÕES.....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
APÊNDICE.....	71

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Esquema de 3 estágios da digestão anaeróbica.....	12
Figura 2: Esquema do biodigestor convencional.....	19
Figura 3: Filtro anaeróbico.....	20
Figura 4: Esquema do biodigestor de contacto.....	21
Figura 5: Biodigestor tipo fluxo ascendente.....	22
Figura 6: Esquema do biodigestor utilizado.....	30
Figura 7: Esquema do sistema utilizado no experimento.....	33
Figura 8: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH ₃ COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO ₃ /l (-.-.-) do biodigestor 1.....	42
Figura 9: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH ₃ COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO ₃ /l (-.-.-) do biodigestor 2.....	43
Figura 10: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH ₃ COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO ₃ /l (-.-.-) do biodigestor 3.....	47
Figura 11: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH ₃ COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO ₃ /l (-.-.-) do biodigestor 4.....	48
Figura 12: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH ₃ COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO ₃ /l (-.-.-) do biodigestor 5.....	50

Figura 13: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH/l}$ (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO_3 (-.-.-) do biodigestor 6.....	51
Figura 14: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (-) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 1.....	54
Figura 15: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, biodigestor 2.....	55
Figura 16: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 3.....	56
Figura 17: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 4.....	57
Figura 18: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 5.....	58
Figura 19: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 6.....	59

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1: Composição química percentual do soro para caseína e para queijo.....	2
Tabela 2: Equivalência de 1 m ³ de biogás (5.000 kcal/m ³).....	5
Tabela 3: Quantidade média de gás produzido a partir de diferentes matérias-primas.....	6
Tabela 4: Análises físico-químicas do soro de queijo.....	31
Tabela 5: Tratamentos utilizados no ensaio.....	32
Tabela 6: Sistemas de alimentação utilizado em cada TR.....	35
Tabela 7: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 1 e 2 mantidos a 35 ^o C.....	72
Tabela 8: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 3 e 4 mantidos a 35 ^o C.....	73
Tabela 9: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 5 e 6 mantidos a 35 ^o C.....	74
Tabela 10: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 1 e 2.....	75
Tabela 11: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 3 e 4.....	76

Tabela 12: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 5 e 6.....	77
Tabela 13: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.....	78
Tabela 14: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.....	79
Tabela 15: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.....	80
Tabela 16: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.....	81
Tabela 17: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo sem correção de pH a 35°C (Biodigestores 1 e 2).....	82
Tabela 18: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo sem correção de pH a 5,5 e mantidos a 35°C (Biodigestores 3 e 4).....	83
Tabela 19: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo com correção de pH a 6,5 e mantidos a 35°C (Biodigestores 5 e 6).....	84
Tabela 20: Remoção total de DQO em cada TR mantidos a 35°C e utilizando 5,38 g DQO/dia.....	85

UTILIZAÇÃO DE SORO DE QUEIJO NA DIGESTÃO ANAERÓBICA

Autora: TAIS HELENA MARTINS LACERDA

Orientador: Prof. Dr. ANTONIO JOAQUIM DE OLIVEIRA

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho consistiu em avaliar a digestão anaeróbica do soro de queijo (68.000 mg DQO/l) com e sem correção de pH utilizando bicarbonato de sódio, em digestores semicontínuos de escala laboratorial e mantidos à temperatura de 35°C.

Foi utilizado como inóculo esterco bovino, com teor de sólidos totais igual a 8%.

O experimento foi desenvolvido num período de 100 dias, onde os primeiros 20 dias foram caracterizados pela aclimação do inóculo e quatro tempos de retenção (TR) de 20 dias. Uma carga máxima de alimentação de 5,38 g DQO/dia foi adicionada a cada digestor.

No 1ºTR a alimentação foi adicionada nos digestores em intervalos de 8 horas. No 2ºTR a carga foi dividida em 2 partes e adicionada aos digestores em interva-

los de 12 horas. No 3ºTR intervalos de 6 horas para a alimentação foi utilizado, com a divisão da carga em 4 partes. O 4ºTR foi caracterizado pela alimentação sem divisão da carga nos digestores.

Para um controle do experimento, análises de ácidos graxos voláteis, alcalinidade e pH, juntamente com a produção de biogás foram realizadas. A composição do biogás foi determinada em cromatógrafo a gás com coluna Porapak N e análise da demanda química de oxigênio (DQO) no efluente foi também determinada.

Os resultados do presente trabalho mostram que o sistema de alimentação afetou o desenvolvimento da digestão anaeróbica, e conseqüentemente a produção de metano. A máxima produção de metano foi obtida quando se fez a correção do pH do soro de alimentação e não houve diferença entre os dois níveis de correção do pH (5,5 e 6,5).

ANAEROBIC DIGESTION UTILIZING CHEESE WHEY

Author: TAIS HELENA MARTINS LACERDA

Adviser: Prof. Dr. ANTONIO JOAQUIM DE OLIVEIRA

SUMMARY

The main objective of this work was to evaluate the anaerobic digestion of cheese whey (68.000 mg DQO/l) with and without correction of the whey pH by sodium bicarbonate, in semi-continuous laboratory soad digestors with the temperature kept at 35°C.

A cattle seed manure was utilized with 8% total solids.

The experiment was developed in a period of 100 days, in which the first 20 days period was characterized for acclimatization of seed manure and four 20 days hidraulic retention times. A maximum loading of 5,38 g DQO/day was feed to each digestor.

In the first hidraulic retention time the loading was feed to the digestors at intervals of 8 hours. In the second hidraulic retention time the loading was divided in two portions and feed to the digestors at intervals of 12 hours. For the third retention time a 6 hours

interval for feeding were used, being the loading divided in four portions. The fourth retention time was characterized by feeding the total loading in the digesters only once.

For an experimental control, volatile fatty acids, alkalinity, pH and the volume of biogas produced were monitored. The biogas composition was determined by gas chromatography using a Porapak N column. The chemical oxygen demand (COD) in the effluent was also measured.

The results obtained show that there was some influence of the feeding systems on the anaerobic digestion of the whey and also on the methane production. The maximum methane production was achieved when the feeding whey had the pH corrected and there was no difference between the levels of pH correction (5,5 and 6,5).

1. INTRODUÇÃO

O soro de queijo é um resíduo altamente poluidor obtido da fabricação de queijos e caseína.

A produção de soro depende principalmente da manufatura e do tipo de queijo produzido, que corresponde a aproximadamente 9 l de soro por kg de queijo; deste modo as regiões que contêm laticínios possuem um grande problema em relação a disposição final do resíduo (BARFORD et alii, 1986; ZEIKUS, 1986).

No Brasil, a demanda de queijos para o ano de 1984 foi estimada em 225.590 toneladas, correspondendo a uma disponibilidade de 2.000.000 toneladas de soro (INDI, 1981).

O soro de queijo contém parte das proteínas do leite (lactoalbumina e lactoglobulina), a maioria das vitaminas hidrossolúveis (riboflavina e tiamina), lactose e alguns sais minerais (BARFORD et alii, 1986); a poluição que o soro causa é devida principalmente à lactose, responsável por 80% desta poluição contra 20% devida à fração protéica (FERRAT, 1980). Na Tabela 1 é apresentada a composição química do soro.

Tabela 1: Composição química percentual do soro para caseína e para queijo

Componentes	Soro para caseína %	Soro para queijo %
Lactose	4,6	4,9
Ácido láctico	0,4	0,2
Cinzas	0,7	0,6
Proteínas	0,9	0,9
Gordura	0,1	0,3
Matéria seca total	6,7	6,9
Água	93,3	93,1

Fonte: BYLUND (1975)

Se este soro for descartado em cursos d'água, prática comum em muitas indústrias, constituir-se-á em um dos mais potentes resíduos industriais, devido a sua elevada demanda química de oxigênio (DQO = 60.000 a 80.000 mg/l), passando a ser um problema adicional para as indústrias de laticínios, além da grande perda representada pelo seu descarte (VIEIRA et alii, 1985).

Vários métodos para tratamento e utilização do soro vem sendo propostos a fim de reduzir o nível de poluição, que estão descritos à seguir:

- Secagem do soro para utilização como ali-

mento animal ou aditivo alimentar (KOSIKOWSKI, 1967); entretanto a quantidade de energia gasta para a secagem torna-o anti-econômico;

- Recuperação da lactose por cristalização e futura utilização em alimentos infantis e produtos farmacêuticos; mas os mercados são bastante limitados e geralmente utilizam outros carboidratos mais baratos (BARFORD et alii, 1986).

- Recuperação de proteína e lactose por osmose reversa ou por ultrafiltração (ZEIKUS, 1986); estes processos são anti-econômicos e geralmente ocorre contaminações nas proteínas;

- Produção de proteína microbiana ou fermentação alcoólica (IZAGUIRRE & CASTILHO, 1982, _____, 1986; REESEN & STRUBE, 1978); esses processos requerem secagem do soro no armazenamento para utilização como substrato, o que não ocorre com outros substratos alternativos como o melão.

Dos tratamentos citados anteriormente, exceto de osmose reversa, continuam gerando efluentes com elevadas cargas poluidoras e em alguns casos para a disposição do resíduo final há necessidade de tratamentos auxiliares.

Os sistemas de tratamento biológico de resíduos (aeróbicos, anaeróbicos ou em conjunto), vem sendo bas-

tante utilizado. A degradação aeróbica consiste na conversão bacteriana do material orgânico em produtos finais sólidos, em contraste com a degradação anaeróbica que converte os poluentes via uma série de reações metabólicas em produtos finais gasosos, principalmente metano e dióxido de carbono que pode ser utilizado como fonte de energia (DIETCHFIELD, 1986).

No Brasil, os métodos convencionais de tratamento de resíduos líquidos industriais são basicamente aeróbicos, apesar de incluir uma fase anaeróbica de digestão de sólidos, separados durante o tratamento aeróbico. Os processos aeróbicos que vêm sendo utilizados são as plantas de lodo ativado (mas que as tornam inviável economicamente para o tratamento de resíduos líquidos com elevado teor de matéria orgânica como o soro de queijo, porque requerem grandes quantidades de energia para a aeração e agitação) e lagoas de estabilização (CEREDA et alii, 1986).

A digestão anaeróbica de resíduos industriais líquidos oferece um excelente controle de poluição e produz energia alternativa, o biogás, o qual poderá abastecer parte da energia necessária à instalação, como aquecimento de caldeiras, acionar motores e geradores (energia elétrica) etc., assim competindo diretamente com os derivados do petróleo e energia elétrica (LO & LIAO, 1986a).

Na Tabela 2 é mostrado a equivalência de 1 m³ de biogás com poder calorífico superior a 5.000 kcal/m³, com

outros combustíveis.

Tabela 2: Equivalência de 1 m³ de biogás (5.000 kcal/m³)

Combustível	Peso específico	rCS* (kcal/kg)	Quantidade equivalente
Gasolina	0,73	11.100	0,62 l
Querosene	0,79	10.900	0,58 l
Óleo diesel	0,82	10.900	0,56 l
Gás liquefeito de petróleo	0,54	11.900	0,42 l
Gás encanado	-	4.750 (kcal/m ³)	1,05 m ³
Óleo combustível	0,96	10.400	0,48 kg
Lenha	-	3.250	1,54 kg
Carvão vegetal	-	6.790	0,74 kg
Etanol	-	7.100	0,7 kg
Metanol	-	5.400	0,93 kg
Xisto	-	1.458	3,43 kg

Fonte: DANESE (1981)

É de fundamental importância, reduzir os preços de energia através da substituição parcial ou total por fontes de baixo custo. No período de 1980 a 1983, cerca de 300 biodigestores a nível de produção rural foram instalados no Brasil (SILVA, 1984); com isso a energia obtida a partir de resíduos agrícolas conseguiu suprir parte da energia necessária nestes locais.

A quantidade de gás produzida, assim como a sua composição, depende das condições em que se realiza o processo e o tipo de substrato utilizado (DANESE, 1981).

Na Tabela 3 são mostradas as quantidades médias de gás produzidas a partir de diferentes matérias-primas.

Tabela 3: Quantidade média de gás produzido a partir de diferentes matérias-primas

Resíduo	m ³ biogás/ton resíduo
Lodo primário	28*
Lixo (parte orgânica)	75*
Lixo + lodo primário (80:20)	155*
Esterco bovino	38*
Esterco de galinha	62**
Esterco suíno	78**
Vinhaça	10*
Rama de mandioca + esterco bovino (80:20)	70*

* Resultados do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas)

** Technische Universität Berlin

Fonte: DANESE (1981)

Através de estudos detalhados da digestão anaeróbica do soro de queijo em escala laboratorial e posteriormente em plantas piloto, poder-se-á então avaliar o

potencial de produção de energia desse subproduto da indústria de laticínios, visando a implantação de projetos em escala industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Generalidades

A digestão anaeróbica vem sendo utilizada a quase 100 anos no tratamento de resíduos, principalmente lodo de esgoto. Na atualidade, poucas informações químicas e microbiológicas sobre este processo fermentativo são disponíveis, embora pesquisas neste campo venham aumentando nas últimas décadas (CEREDA, 1986).

No Brasil, os estudos com biogás foram iniciados de maneira mais intensa a partir de 1976, entretanto, os resultados alcançados asseguram um bom domínio tecnológico, concluindo que estamos qualificados a desenvolver um vasto programa a nível nacional com biogás, tanto no setor agrícola como no industrial (BATISTA, 1981).

O processo da digestão anaeróbica, consiste na degradação de compostos orgânicos em substâncias mais simples como metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), através da interação de diferentes microrganismos que atuam na ausência de oxigênio (GONÇALVES, 1982).

Segundo HUGHES, (1980) e COSTA (1986), dos tratamentos biológicos de resíduos, a digestão anaeróbica concorre com três aspectos relevantes:

- Estabilização do material orgânico pela degradação das moléculas, onde faz com que haja uma diminuição da poluição (reduções DQO e DBO);

- Produção de biogás, fonte alternativa de energia, pela metabolização do substrato;

- Produção do biofertilizante.

A composição volumétrica do biogás proveniente dos biodigestores varia entre 50 a 70% de metano e entre 30 e 50% de dióxido de carbono, contendo ainda pequenas quantidades de hidrogênio (H_2), amônia (NH_3), vapor d'água no estado saturado e traços de sulfeto de hidrogênio (H_2S). A quantidade de CO_2 presente no gás reduz seu conteúdo de energia, tornando seu custo de armazenagem mais dispendioso em relação ao metano puro; o biogás é muito pouco solúvel em água, possibilitando assim seu aproveitamento como combustível sem maiores tratamentos (DANESE, 1981).

O potencial de produção e utilização do biogás deve ser analisado em função das disponibilidades locais das matérias-primas passíveis de serem transformadas. Em zonas rurais as matérias-primas disponíveis são as prove-

nientes de dejetos animais e resíduos agrícolas, onde irão atender as necessidades energéticas básicas como cocção de alimentos, iluminação, geração de energia elétrica, etc.; nos centros urbanos, o lixo e o esgoto doméstico, coletados diariamente representam o grande potencial de uso dos produtos resultantes, e o gás poderia ser encanado para suprir residências de bairros mais carentes; em indústrias, o potencial de produção e consequente utilização de biogás depende da disponibilidade de efluentes biodegradáveis gerados em seus processos industriais. Dentre estas, destacam-se indústrias de açúcar e álcool, laticínios, matadouros, cervejarias etc. (DANESE, 1981).

ZINDER (1984) define alguns pontos preliminares sobre a bioconversão do material a ser digerido em metano:

- Especificação metabólica dos anaeróbicos. No caso de cultura pura de aeróbicos, a mineralização da celulose a CO_2 é completa, porém a conversão anaeróbica da celulose ou outros compostos em CH_4 e CO_2 requer uma interação cooperativa de várias espécies microbianas;
- A maior parte de energia livre presente no substrato pode ser verificada no metano que foi produzido;
- muitos dos mais importantes microrganismos envolvidos são estritamente anaeróbicos.

2.2. Etapas da Biossíntese de Metano

O processo da digestão anaeróbica envolve uma grande variedade de microrganismos simbióticos. Essas formas complexas de associações, metabolizam continuamente o material orgânico em metano e dióxido de carbono. Para a explicação deste processo, a digestão anaeróbica é dividida em três estágios, como mostra a Figura 1 (DITCHFIELD, 1986; TOERIEN et alii, 1970).

Os três grandes grupos de microrganismos envolvidos nestes estágios são:

- Bactérias hidrolíticas fermentativas, (I)
- Bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio, (II)
- Bactérias metanogênicas (III)

O primeiro estágio envolve bactérias hidrolíticas fermentativas, que hidrolizam polissacarídeos, lípidos e proteínas a produtos mais simples como ácidos orgânicos (ácidos acético, propiônico e butírico), álcoois, H_2 e CO_2 (BRYANT, 1979).

O segundo estágio envolve bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio, onde todos os ácidos graxos saturados (exceto o acetato) são oxidados nesta fase do processo a acetato e H_2 e descarboxilam o propionato a ace-

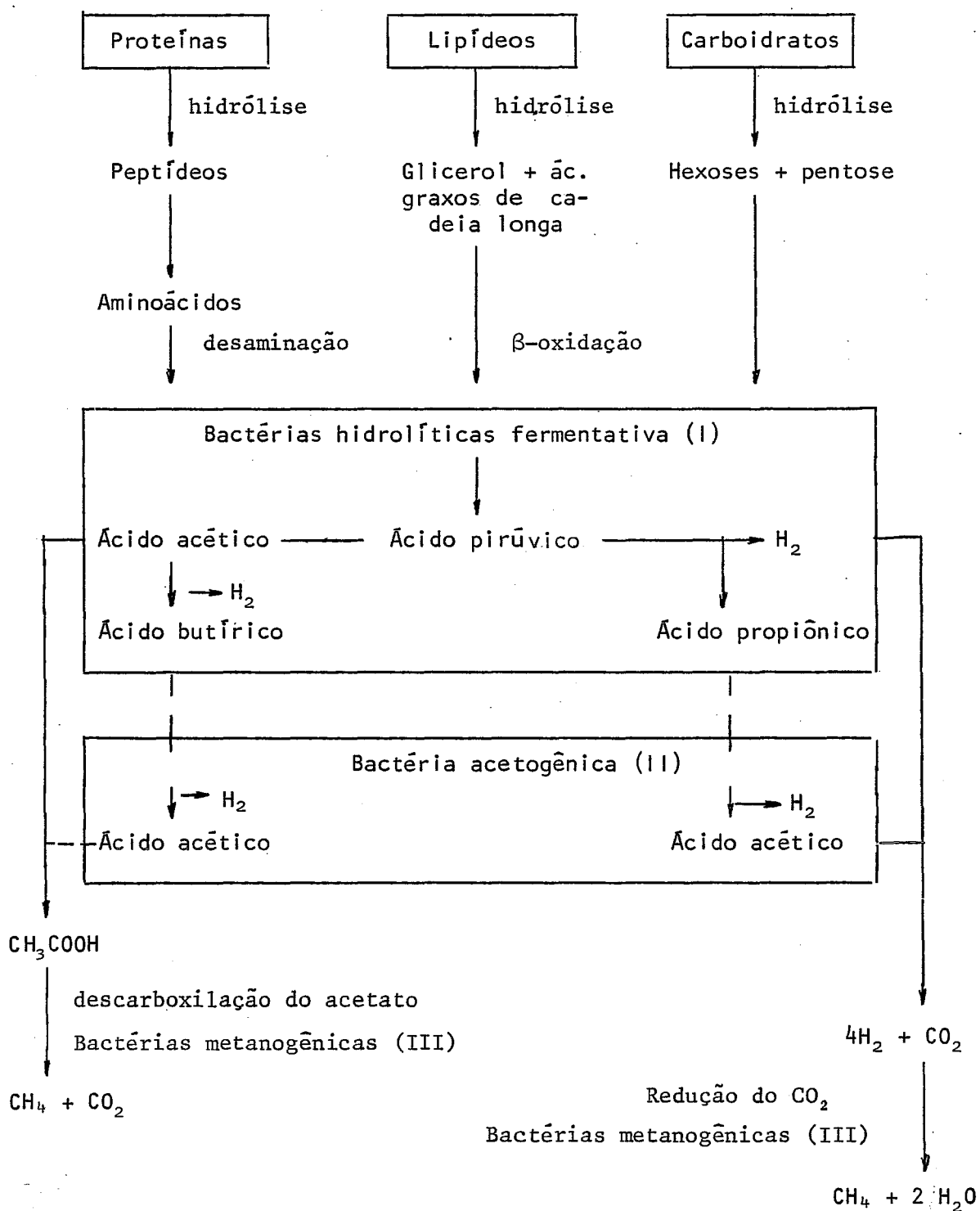


Figura 1: Esquema de 3 estágios da digestão anaeróbica

Fonte: DITCHEFIELD (1986)

tato, CO_2 e H_2 . Os álcoois formados no primeiro estágio são oxidados a acetato ou outros ácidos, dando produção de H_2 (BRYANT, 1979; DITCHFIELD, 1986).

O terceiro estágio envolve as bactérias metanogênicas as quais utilizam os produtos do primeiro e segundo estágio (H_2/CO_2 e/ou acetato) na produção de CH_4 e CO_2 . Este grupo de microrganismo é bastante heterogêneo em sua forma e estrutura, sendo a característica comum entre eles a forma de obtenção de energia para crescimento que leva a formação de metano. Estes necessitam de condições extremamente rigorosas de anaerobiose e podem crescer somente quando o potencial de redox do meio for menor que -300 mV (WOLFE, 1981; KUBIAK & DUBUIS, 1985).

Suas necessidades nutricionais são bastante simples, sendo que a maioria requer alguns sais minerais, CO_2 , amônia como fonte de nitrogênio e sulfeto como fonte de enxofre. Algumas espécies requerem a adição de acetato, vitaminas do grupo B, 2-metil butirato ou fatores de crescimento proveniente de líquido ruminal ou biodigestores de esgoto (BRYANT, 1979 & PERES, 1982).

Dos grupos de microrganismos encontrados nos biodigestores, as bactérias metanogênicas são as mais susceptíveis à variações ambientais e possuem velocidades de crescimento bem baixas, o que torna limitante para o processo (DITCHFIELD, 1986).

Cerca de 70% do metano formado nos biodigestores provém da descarboxilação do acetato; esse nível pode aumentar de 4 a 6% com a hidrólise de lipídeos e proteínas, isto é explicado pela reação acetogênica ($H_2 + CO_2 \rightleftharpoons$ Acetato + H_2O) (PERES, 1982; MAH et alii, 1977).

Através de estudos obtidos por vários pesquisadores sobre a enumeração das populações bacterianas de biodigestores, foram encontradas bactérias hidrolíticas total ($10^8 - 10^9$ /ml; a maioria bastonetes Gram negativos); bactérias proteolíticas (10^7 /ml; principalmente o gênero *Eubacterium*); bactérias celulolíticas (10^5 /ml, gênero *Clostridium*); bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio (10^6 /ml, foram identificados bastonetes Gram negativos); bactérias homoacetogênicas ($10^5 - 10^6$ /ml; os gêneros *Clostridium* e *Acetobacterium*); e as bactérias metanogênicas ($10^6 - 10^8$ /ml, principalmente *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanosarcina* e "Methanothrix" (ZEIKUS, 1977; ZEIKUS, 1980).

2.3. Parâmetros que Afetam a Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica é bastante sensível às variações ambientais, qualquer alteração que ocorra no processo acarretará desequilíbrios entre as populações bacterianas afetando diretamente o rendimento e a velocidade do processo (SOUZA, 1982a).

PERES (1982) cita ser extremamente difícil analisar os efeitos químicos e físicos em qualquer sistema biológico e em um biodigestor os principais parâmetros que devem ser constantemente analisados são: temperatura, pH, composição da matéria orgânica; taxa de alimentação e composição inorgânica do substrato.

A digestão anaeróbica pode se dar em temperaturas superiores a 10°C e inferiores a 65°C . Nessas condições, a produção de metano tem duas situações ótimas, uma em fase mesofílica em torno de 40°C , a outra em zona termofílica em torno de $50-55^{\circ}\text{C}$ (KUBIAK & DUBUIS, 1985). SOUZA (1982a) relata ser extremamente importante manter a temperatura constante e operar sem variações significativas.

A faixa de pH ótima para o crescimento de muitos microrganismos se encontra entre 6,4 a 7,2. Se houver uma diminuição do pH pode resultar numa elevação na concentração de ácidos graxos voláteis e portanto inibição da metanogênese, se o pH estiver acima de 8,0 leva a uma maior formação de hidrogênio e amônia (BARKER, 1956). O equilíbrio do pH é essencialmente assegurado pelos bicarbonatos dissolvidos e sua concentração deve ser pelo menos igual ou maior que 1.500 mg/l para garantir os níveis necessários de biodigestão (KUBIAK & DUBUIS, 1985).

A composição química da matéria orgânica afeta grandemente a biodigestão. De uma maneira geral, o mate-

rial orgânico a ser degradado são carboidratos, lipídeos e proteínas. Existem certos grupos de componentes que se encontram inacessíveis ao complexo enzimático das bactérias (celulose impregnada de lignina como nas madeiras, proteínas dos cabelos); tornando-os assim um substrato pouco biodegradável. Outra forma de se analisar este parâmetro é a necessidade nutricional de cada bactéria; Por exemplo, as bactérias acidogênicas tem uma grande flexibilidade quanto a utilização de nutrientes, podendo assim, metabolizar uma gama vasta de materiais; já as bactérias metanogênicas necessitam de poucos nutrientes para o seu crescimento (COSTA, 1986).

As condições de funcionamento estabelecidas (tipo de processo escolhido, temperatura etc.) afeta diretamente as populações microbianas e obviamente reflete na produção de metano (PERES, 1982). Estes parâmetros estão diretamente relacionados com o tempo de retenção hidráulica (TR) que é o parâmetro normalmente utilizado para expressar a velocidade do processo, onde este é definido como volume do digestor/vazão do resíduo. Há exemplos de processos de digestão anaeróbica operando com TR desde algumas dezenas de dias até algumas poucas horas. Por exemplo, para um resíduo que contiver 1g de matéria orgânica/l o outro 10 g/l, a digestão anaeróbica do resíduo mais concentrado deve ocorrer com uma velocidade 10 vezes maior, em relação

a digestão anaeróbica do resíduo menos concentrado sob o mesmo TR, isto para obter-se igual eficiência (SOUZA, 1982a).

SILVA (1977), mostra valores indicativos de uma digestão para lodo de esgoto:

- pH nunca menor que 7,2;
- Biogás com teor de metano acima de 65%;
- Biogás com teor de CO_2 máximo de 30%;
- temperatura entre 28 a 35°C (faixa mesofílica);
- ácidos voláteis abaixo de 500 mg/l. Um súbito aumento de 200 a 300 mg/l no teor normal, indica sinal de perigo, tendo como solução reduzir a alimentação;
- alcalinidade total maior que 1.500 mg/l como $CaCO_3$;
- não deve haver excesso de espumas no topo do nível líquido.

2.4. Tipos de Biodigestores

Os biodigestores podem assumir diversas formas construtivas e a escolha dentre os diferentes tipos de-

pende da aplicação específica a que se destina, dos substratos empregados e dos recursos disponíveis para sua implantação (BARBOSA, 1982).

Os biodigestores de uso mais generalizado (modelo Indiano e Chinês), possuem eficiência relativamente baixa, e têm como vantagem a utilização em meios rurais em pequenas propriedades, gerando soluções a curto prazo para os problemas de energia (COSTA, 1986).

2.4.1. Concepção convencional

A digestão anaeróbica pelo processo convencional, consiste em um tanque fechado, com ou sem agitação, podendo ou não ter um sistema de aquecimento ou apenas um isolante térmico. Este processo exige grandes volumes de biodigestão porque utilizam tempos de retenção bastante grandes (12 a 60 dias).

Na Figura 2 é mostrado o esquema de biodigestores convencionais.

Estes biodigestores são empregados em resíduos semi-sólidos devido ao seu elevado conteúdo de sólidos em suspensão como é o caso do lodo de esgoto e resíduos agrícolas (SOUZA, 1982b, CRAVEIRO, 1980).

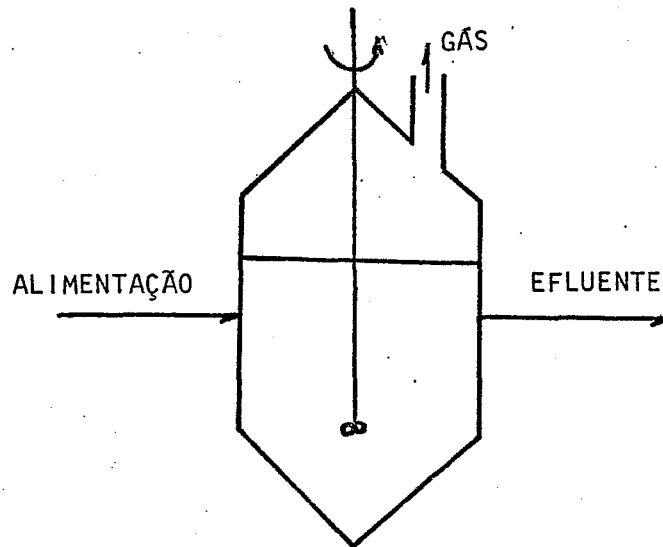


Figura 2: Esquema do biodigestor convencional

2.4.2. Concepção não-convencional

Utilizados em tratamentos de resíduos líquidos industriais onde o conteúdo de sólidos em suspensão é bem menor.

Os biodigestores não-convencionais operam em tempos de retenção bem baixo (5 a 50 horas), com isso os volumes dos biodigestores são bastante reduzidos. O princípio básico desses biodigestores consiste em reter no sistema parte do lodo formado e assim as bactérias responsáveis pelo processo, impedindo sua eliminação com o efluente (SOUZA, 1982 b).

2.4.2.1. Filtros anaeróbicos

São biodigestores constituídos de um leito com material de enchimento adequado (pedras, anéis de Rasching, feixe de tubos etc.), o qual fica completamente imerso no líquido. O resíduo a ser tratado é alimentado geralmente pela extremidade inferior do filtro e é descartado pela extremidade superior (COSTA, 1986).

Parte do lodo adere-se ao material de enchimento e parte fica retida nos interstícios de enchimento; assim, o material de enchimento atua como uma barreira física para evitar que o lodo deixe o sistema (Figura 3).

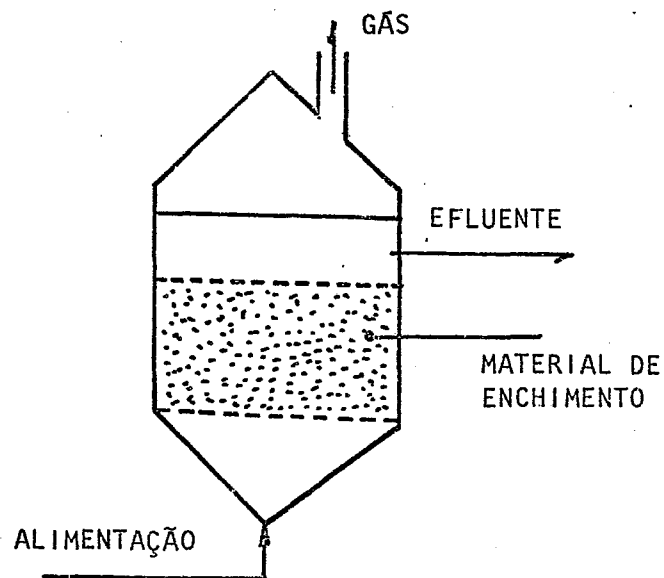


Figura 3: Filtro anaeróbico

2.4.2.2. Biodigestores de contato.

São biodigestores providos de sistema de agitação interna além de decantação externa do efluente, permitindo que o lodo decantado, ou parte dele, retorne ao reator num mecanismo de reinoculação contínua ou intermitente (Figura 4) (COSTA, 1986).

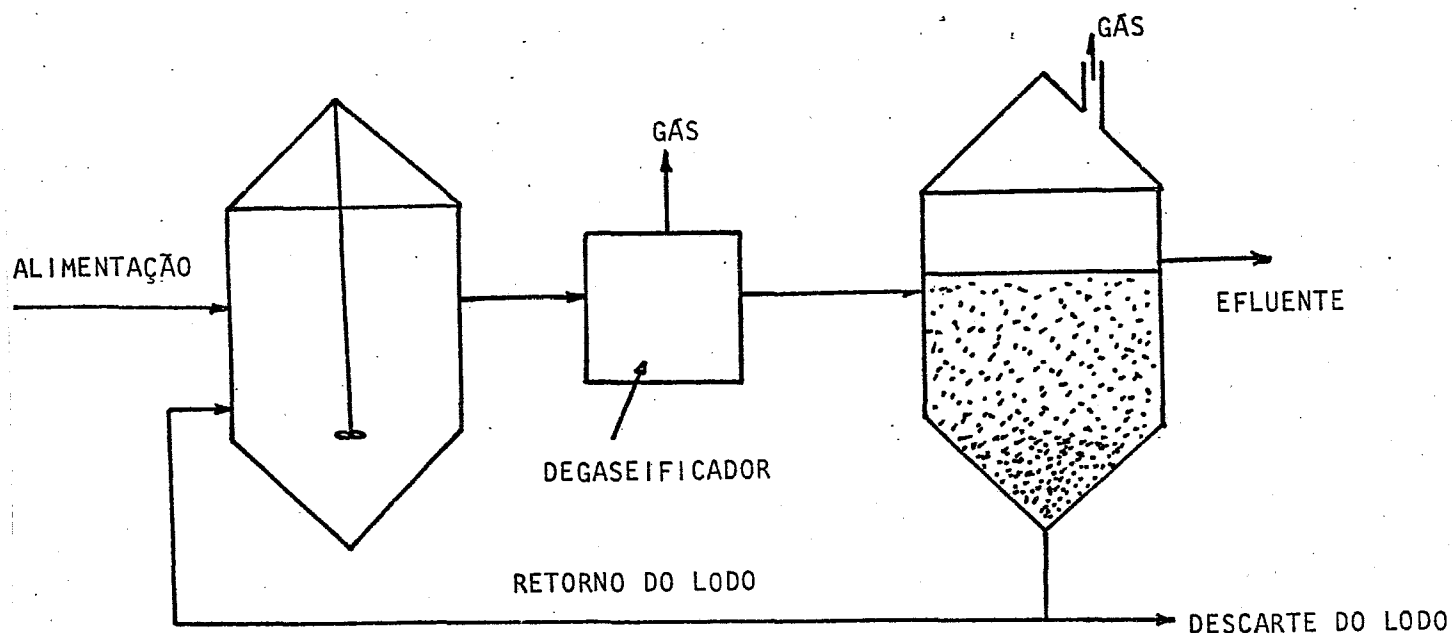


Figura 4: Esquema do biodigestor de contacto

2.4.2.3. Biodigestor de fluxo ascendente

São biodigestores de reciclo gravitacional

contínuo de lodo, o qual efetua a concentração da biomassa ativa sem necessidade de intervenção de partes mecânicas, de modo que não há destruição dos aglomerados de lodos formados. Desta forma, apenas as partículas de lodo mais leves deixam o biodigestor, permanecendo ao longo do tempo, uma elevada e ativa população microbiana. Na Figura 5 é esquematizado um biodigestor modelo Fluxo ascendente. (COSTA, 1986).

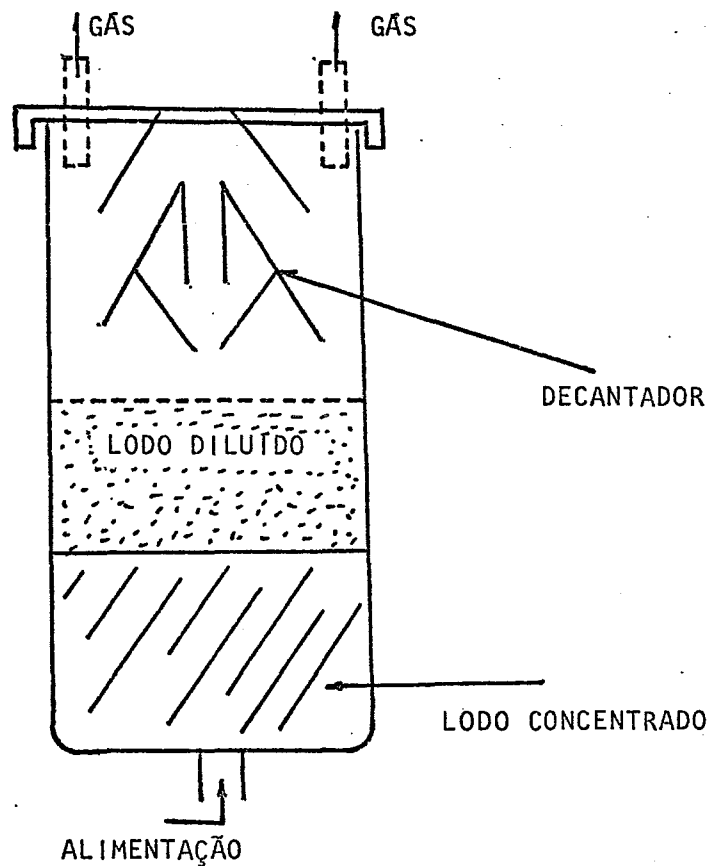


Figura 5: Biodigestor tipo Fluxo ascendente.

2.5. Digestão Anaeróbica do Soro de Queijo

A digestão anaeróbica tem sido empregada em tratamentos de resíduos semi-sólidos (lodos de esgoto, lixo doméstico e o estrume) e nesses casos os biodigestores utilizados são tanques sem recirculação do lodo e os tempos de retenção variam de 15 a 60 dias. Quando os despejos são líquidos, os biodigestores contêm um sistema de recirculação de inóculo (lodo biológico) e consequentemente os tempos de retenção para esses líquidos podem ser reduzidos para 2 a 5 dias (VIEIRA & SOUZA, 1981).

SOUZA (1982b) demonstra que os processos anaeróbicos vêm tornando-se uma alternativa nobre para o tratamento direto de efluentes líquidos industriais e cita também que indústrias como os laticínios onde geram efluentes com elevada carga orgânica, poderiam aplicar a biodigestão visando tratamento de resíduo e produção de biogás.

Cerca de 40% do soro produzido não vem sendo aproveitado mas sim descarregados em rios ou córregos. Devido ao seu elevado conteúdo de matéria orgânica (DBO = 40.000 mg/L) faz com que este se torne um dos mais potentes resíduos das Indústrias de Alimentos (Cerca de 100 kg de soro líquido equivale ao resíduo disponível de 45 pessoas) _____, 1986.

Basicamente, as características de um determinado resíduo industrial que devem ser consideradas para se prever a viabilidade técnica e econômica de seu tratamento por digestão anaeróbica são as seguintes: grau de biodegradabilidade, concentração de nutrientes (Nitrogênio e Fósforo), pH e concentração de compostos tóxicos (SOUZA, 1982a).

Em relação ao grau de biodegradabilidade, um resíduo pode ser considerado biodegradável quando suas demandas químicas e biológicas de oxigênio obedecerem a relação $DQO/DBO = 2$ a 3 ; No caso do soro de queijo a relação se encontra na faixa de $2-3$, com isso evidentemente mais fácil e eficiente será seu tratamento por processos biológicos ($DBO = 30$ a 40 g DBO_5/l de soro, $DQO = 60$ a 80 g DQO/l de soro) (BYLUND, 1975; SOUZA, 1982a).

Para que a digestão anaeróbica de um resíduo ocorra com uma boa performance, este resíduo deve conter concentrações adequadas de nitrogênio e fósforo disponíveis. Certos resíduos necessitam de correções ou controles desses nutrientes. No caso do soro de queijo, a composição química deste 1% de (proteínas e presença da maioria dos sais minerais) é suficiente para tornar o processo viável (LO & LIAO, 1982a e b; VIEIRA & SOUZA, 1981).

Certos resíduos, com pH bem baixo permitem a utilização deste sistema devido à capacidade de tamponamen-

to sem que haja necessidade de adição de álcalis; o soro dependendo da manufatura e o tipo de queijo pode ter ou não pH ácido. No caso do queijo tipo cottage, o soro obtido tem pH ácido (4,7) já no queijo tipo cheddar, o soro obtido tem pH próximo a neutralidade (6,1). Nos resíduos com pH ácidos há necessidade de correções para manter o controle do pH na faixa ótima do funcionamento do biodigestor (_____, 1986; ARAÚJO et alii, 1986).

A digestão anaeróbica do soro de queijo vem sendo estudada por inúmeros pesquisadores e a eficiência deste tratamento é grandemente afetada pelo tipo de resíduo e biodigestor.

ARAÚJO et alii (1986) utilizaram dois biodigestores em escala de bancada para a produção de biogás a partir de soro de queijo utilizando tempo de retenção hidráulica de 20 a 30 dias, onde a temperatura foi mantida à 36°C. Nesse experimento, conseguiram atingir a produção de 1,1 litros de biogás por grama de sólidos voláteis adicionados; a carga máxima aplicada foi de 1,8 grama de sólido voláteis por litro de biodigestor.

COSTA & LACAVA (1986) estudaram observações preliminares da digestão anaeróbica do soro de queijo tipo frescal sob diversas condições de cultura. Processaram a digestão do soro à pequenos volumes (50 ml) em frascos de

225 ml, inoculados com mais de 5% de esterco bovino digerido, estando estes frascos sob atmosfera de N_2 e submetidos a diferentes condições resultantes da combinação dos parâmetros pH e temperatura. As melhores condições de digestão observadas foram a temperatura de $37^{\circ}C$, principalmente com pH 6,2 nas concentrações de 10% e 50% do soro.

LO & LIAO (1986 a e b) utilizaram um biodigestor em escala laboratorial rotatório de contato para produção de biogás a partir de soro de queijo. Foi estudada a digestão contínua de soro à temperatura mesofílica ($35^{\circ}C$) e tempos de retenção de 11 a 5 dias. A produção de metano alcançada foi de 1,68 a $3,26 \text{ l CH}_4 \text{ l biogás}^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$, com uma remoção de 76 a 93% da DQO. Como o soro possui elevado teor orgânico, houve necessidade de fazer diluição quando foi utilizado $TR = 5$ dias. Um sistema de biodigestão de dois estágios utilizando biodigestores de contato foi também estudado, os resultados alcançaram uma eficiência de 89,5% de remoção de DQO.

HARISCHANDRA & SAVENA (1969), utilizando biodigestores com sistema de agitação conseguiram reduzir 83% de DBO com uma carga de $2,92 \text{ kg DBO m}^3^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$.

FOLLMANN & MARKL (1979a) conseguiram reduzir 98% de DQO do efluente centrifugado com uma carga adicionada nos biodigestores de $5,6 \text{ kg DQO m}^3^{-1} \cdot \text{dia}^{-1}$ mesmos

autores estudando em escala laboratorial a digestão anaeróbica do soro, conseguiram produzir 36,8 l de biogás/l de soro. Neste trabalho foram necessários 35 dias para a estabilização e o pH controlado ao redor de 7,0 com um tempo de retenção de 12,5 dias.

Holder & Swards, citado por BARFORD et alii (1986), utilizaram um biodigestor de contato em escala laboratorial para estudar a digestão anaeróbica de soro de queijo; a redução de DQO conseguida foi de aproximadamente 90% utilizando uma alimentação de $4,0 \text{ kg DQO/m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$.

Parker, citado por BARFORD et alii (1986) utilizando tratamento similar de HOLDER & SEWARDS, conseguiu obter uma boa eficiência no tratamento do soro de queijo utilizando uma carga de $6,0 \text{ kg m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$.

HICKEY & OWENS (1980) utilizando biodigestores de leite fluidizado para estudar a digestão do soro, conseguiram reduzir 83,6% de DQO utilizando $13,4 \text{ kg DQO m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ num tempo de retenção de 1,4 dia.

BARFORD et alii (1986), estudaram a digestão anaeróbica de soro de queijo em escala laboratorial utilizando uma carga máxima de $16,1 \text{ kg DQO m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$; foi obtido uma remoção de DQO de aproximadamente 99%; neste mesmo trabalho os autores avaliaram a eficiência da adição de floculantes químicos com a finalidade de elevar a quantidade de biomassa

nos biodigestores e conseguiram um aumento desta em relação a um biodigestor controle.

SUTTOW & LI (1981) alimentando um biodigestor de leite fluidizado com uma carga de soro de 5,3 - 7,4 kg DQO/m³.dia conseguiram remover aproximadamente 82% de DQO. Switzen Baum & Dankin, citado por BARFORD et alii (1986), utilizaram um biodigestor de leite fluidizado no tratamento de soro de queijo, neste trabalho a remoção de DQO foi de aproximadamente 92% com uma carga adicionada ao biodigestor de 8,2 kg DQO/m³.dia.

BOENING & LARSEN (1982) estudaram o tratamento do soro obtido da fabricação de caseína na digestão anaeróbica utilizando biodigestores de leite fluidizado. A eficiência alcançada foi de aproximadamente 90% de remoção de DQO adicionando uma carga de 7,7 kg DQO/m³.dia e 70% de remoção de DQO adicionando 19,5 kg DQO/m³.dia, ambos tratados a 35°C. Neste trabalho foi mostrado que a eficiência da remoção do material orgânico diminui com o aumento da carga de DQO de alimentação. Outro exemplo deste acontecimento é citado por BARFORD et alii (1986) onde adicionaram 37,6 kg DQO/m³.dia ao biodigestor e um TR = 4,9 dias; conseguiram remover somente 72% DQO.

Assim, o tratamento de resíduos das Indústrias de Laticínios pela digestão anaeróbica vem mostrando ser

eficiente remoção da DQO do material orgânico; futuramente estudos destes tratamentos devem tentar diminuir o tempo de retenção do resíduo sem afetar a eficiência do tratamento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Biodigestores

Foram utilizados seis biodigestores semicontínuos de material PVC (capacidade = 2 litros) como mostra a Figura 6.

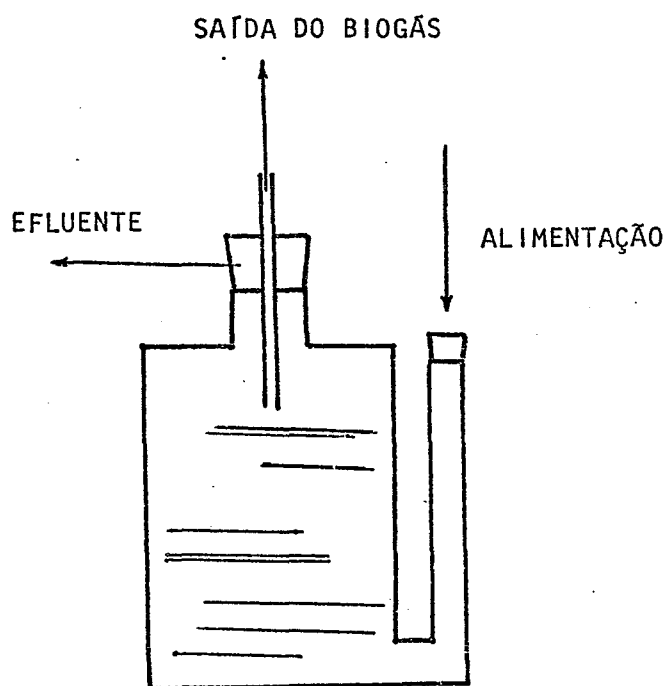


Figura 6: Esquema do biodigestor utilizado.

3.1.2. Inóculo

Cada biodigestor foi inoculado com 1,6 l de uma flora mista (esterco bovino) coletada de um biodigestor em funcionamento cedido pela BRASMETANO Tecnologias Integradas - Piracicaba (SP). O inóculo foi previamente diluído a aproximadamente 8% de sólidos totais (ST).

3.1.3. Substrato

A alimentação dos biodigestores foi efetuada com soro de queijo obtido da fabricação de queijo tipo Minas Frescal na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Na Tabela 4 são mostrados os resultados das análises físico-químicas do soro de queijo utilizado no experimento.

Tabela 4: Características físico-químicas do soro de queijo utilizado

Parâmetro	
pH	4,5 - 4,6
DQO	67.000 - 68.000 mg DQO/l soro
ST	5,43%
SV	50,94%

O armazenamento do soro de queijo para subseqüente utilização foi realizado sob refrigeração à tempera-

tura de $2^{\circ} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$.

3.2. Métodos

3.2.1. Condições gerais do experimento

Para os ensaios foram utilizados 6 biodigestores, com um volume de inóculo igual a 1,6 l, mantidos em banho-maria à $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5$. A operação foi realizada em regime semicontínuo, com alimentação diária dos biodigestores (sendo a carga orgânica de 5,38 g DQO/dia). Os biodigestores, contendo o material em digestão, eram agitados manualmente após cada alimentação e estavam acoplados a um gasômetro de deslocamento de líquidos. Na Figura 7 é esquematizado o sistema operacional do experimento.

O pH do soro de queijo utilizado na alimentação dos biodigestores foram corrigidos com bicarbonato de sódio diariamente como mostram os tratamentos da Tabela 5; nesta Tabela é mostrado também a carga de DQO do soro de alimentação.

Tabela 5: Tratamentos utilizados no ensaio

Tratamento	Biodigestores	pH do soro de queijo	carga adicionada (gDQO/dia)
1	1 e 2	4,5 (normal)	5,38
2	3 e 4	5,5	5,38
3	5 e 6	6,5	5,38

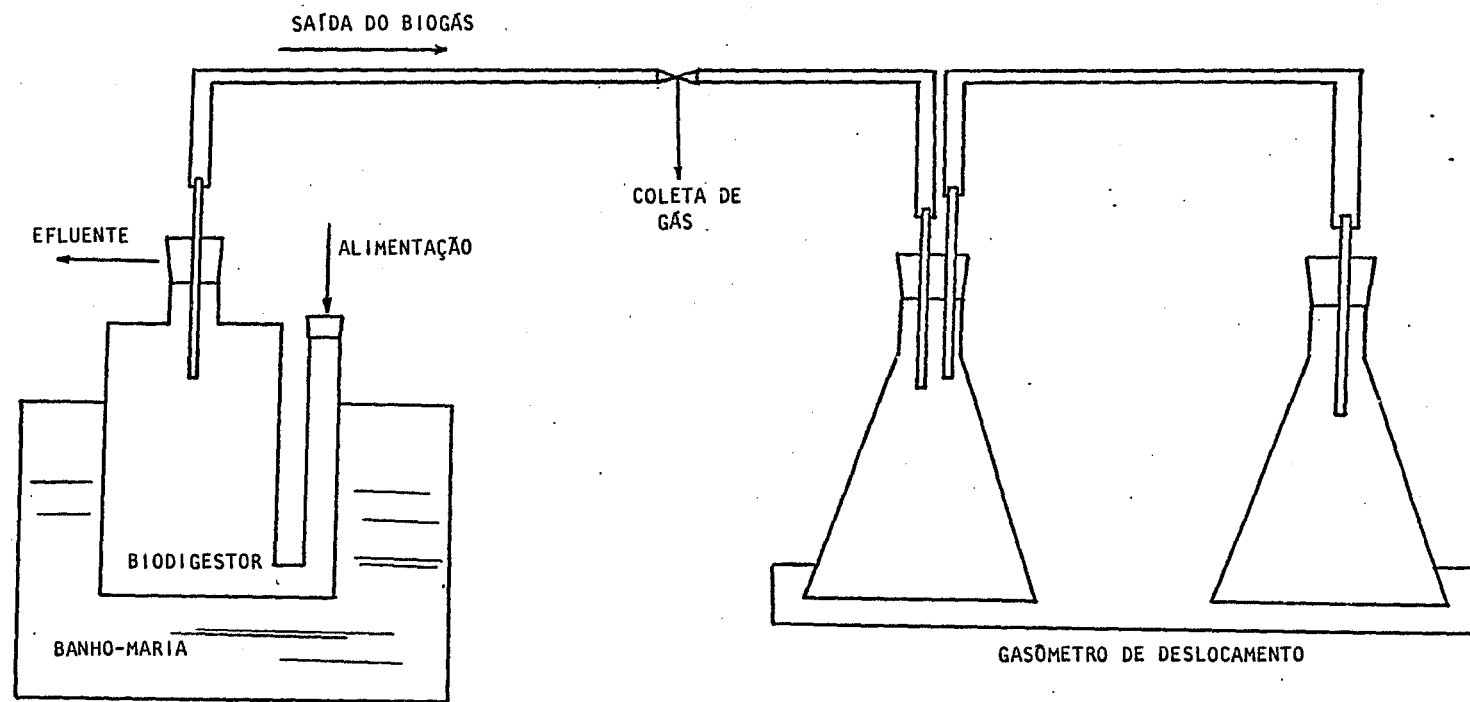


Figura 7: Esquema do sistema utilizado no experimento.

3.2.2. Condução do experimento

A digestão anaeróbica do soro de queijo foi conduzida num período de 100 dias, dividido em 2 estágios.

3.2.2.1. Aclimação do inóculo

A aclimação do inóculo corresponde a uma fase ou período em que deve haver uma adaptação da flora microbiana ao novo substrato empregado. Para tal, os biodigestores foram alimentados com uma carga orgânica correspondente a 1,3 g DQO/dia em relação a carga final prevista (5,38 g DQO/dia), com um aumento gradual desta em relação à eficiência da remoção da carga orgânica, a fim de permitir uma adaptação do inóculo ao soro de queijo. No presente trabalho, foram necessários 20 dias para aclimação do inóculo.

3.2.2.2. Operação normal dos biodigestores

Após atingir a aclimação do inóculo, os biodigestores foram alimentados diariamente com 5,38 g DQO (80 ml de soro de queijo), de modo que o tempo de retenção (TR) do sistema foi fixado então em 20 dias.

Na Tabela 6 são apresentados os quatro tempos

de retenção com os respectivos sistemas de alimentação utilizados no experimento.

Tabela 6: Sistemas de alimentação utilizados em cada TR.

Tempo de retenção	Carga diária adicionada	Parcelamento do volume de soro adicionado durante o dia	Intervalo de tempo (h) para a adição do soro
TR	g DQO	ml	h
1º (1º-20º dia)	5,38	30:20:30	8
2º (21º-40º dia)	5,38	40:40	12
3º (41º-60º dia)	5,38	20:20:20:20	6
4º (61º-80º dia)	5,38	80	24

A cada alimentação efetuada foi retirado simultaneamente pelo topo amostras do efluente, para avaliar o tratamento.

3.2.3. Parâmetros para acompanhar e avaliar o processo da digestão anaeróbica

3.2.3.1. pH

Esta medida foi realizada diariamente, no substrato e efluente, utilizando o medidor de pH modelo DMPH-2/ /Digimed calibrado com solução tampão 7,0 e 4,0.

Para a determinação do pH, uma amostra do efluente de cada biodigestor foi coletada e logo após feito a leitura para evitar alterações desta medida com a perda de CO_2 . Foi considerado o valor mínimo observado (VIEIRA & SOUZA, 1981).

3.2.3.2. Volume de gases produzidos

A produção de gás foi monitorada diariamente utilizando-se para essa medida um gasômetro de deslocamento de líquido com uma solução salina acidulada (solução de Na_2SO_4 , 25% e H_2SO_4 , 5%) (STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER, 1976).

3.2.3.3. Composição do gás

A composição do gás foi monitorada de 3 em 3 dias. A amostra foi retirada pelo coletor com uma seringa, através de um tubo com septo de silicone (tubos new vácuo) e injetadas no cromatógrafo em fase gasosa (VIEIRA & SOUZA, 1981), com coluna N Porapak.

3.2.2.4. Ácidos voláteis

A determinação da quantidade de ácidos voláteis existentes no biodigestor foi efetuada segundo VIEIRA & SOUZA (1981).

Ao efluente centrifugado foi adicionado H_2SO_4 0,1 N pela titulação até pH 3,3.

Para liberação do CO_2 , a amostra foi fervida durante 3 minutos e resfriada em água fria.

Em seguida, o pH da amostra foi corrigido a 4,0 com NaOH 0,1 N e deste ponto foi continuada a titulação até pH 7,0 e anotado o volume gasto de NaOH 0,1 N para correção do pH de 4,0 a 7,0.

A concentração de ácidos voláteis, expressa em mg CH_3COOH/l foi calculada como mostra a fórmula a seguir:

$$\text{Acidez (mg } CH_3COOH/l) = \frac{\text{ml NaOH} \times N \times 60.000}{\text{ml da amostra}}$$

3.2.2.5. Alcalinidade

A alcalinidade foi conduzida pela titulação da amostra centrifugada com H_2SO_4 0,1 N até pH 4,0, anotando-se o volume de solução gasta (VIEIRA & SOUZA, 1981).

A alcalinidade expressa em mg CaCO_3/l foi calculada como mostra a fórmula a seguir:

$$\text{Alcalinidade total (mg CaCO}_3/\text{L)} = \frac{\text{ml de H}_2\text{SO}_4 \times \text{N} \times 50.000}{\text{ml da amostra}}$$

3.2.2.6. Demanda química de oxigênio (DQO)

A DQO é o parâmetro que demonstra o conteúdo de matéria orgânica do resíduo a ser digerido e expressa a eficiência de remoção do material orgânico no efluente.

O método utilizado para determinar a DQO no substrato e efluente é o método segundo STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER, 1976.

Foi colocado cerca de 0,4 g de sulfato de mercúrio em balão de 500 ml de fundo chato juntamente com a amostra do efluente centrifugado e completado o volume a 20 ml mais 10 ml de solução de dicromato de potássio 0,25 N.

Vagarosamente foram adicionados ao balão 30 ml da solução ácido sulfúrico, sulfato de prata e adicionado algumas pérolas de vidro, em seguida conectado ao condensador de refluxo.

A amostra foi refluxada por um período de duas horas e em seguida foi colocada para resfriar e adicionado água destilada até cerca de 140 ml.

O mesmo procedimento foi utilizado para a prova em branco.

Após a adição de 3 gotas de indicador ferroin foram titulados a amostra e o branco com a solução de sulfato ferroso amoniacoal com normalidade padronizada.

Para calcular a DQO do efluente centrifugado a fórmula utilizada foi a seguinte:

$$\frac{(a - b) \times c \times 8.000}{\text{ml da amostra}} = \text{mg/l de DQO}$$

onde:

a = ml de sulfato ferroso amoniacoal gastos com o branco

b = ml de sulfato ferroso amoniacoal gastos com a amostra

c = normalidade da solução de sulfato ferroso amoniacoal

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O principal objetivo deste trabalho consistiu em avaliar em escala laboratorial a digestão anaeróbica do soro de queijo em biodigestores semicontínuos mantidos a faixa mesofílica de $35^{\circ}\text{C} \pm 0,5$.

A digestão anaeróbica foi caracterizada por um estágio inicial que durou aproximadamente 20 dias a fim de conseguir a aclimação do inóculo e quatro tempos de retenção compreendidos num período de 80 dias.

Para uma indicação imediata do funcionamento do processo foram utilizados três parâmetros, pH, alcalinidade e acidez volátil, os quais estão interligados e devem ser observados o seu comportamento em conjunto.

Foi determinado nos biodigestores a eficiência do tratamento anaeróbico em relação à remoção do material orgânico no efluente pela análise de DQO, acompanhados da medição do volume de gases produzidos.

4.1. Variação do pH, Acidez Volátil e Alcalinidade da digestão anaeróbica do soro de queijo com e sem correção de pH

Os resultados obtidos para pH, alcalinidade expressa em mg CaCO_3/l e acidez expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 encontram-se nas Tabelas 7, 8 e 9 do Apêndice e nos Gráficos das Figuras 8, 9, 10, 11, 12, e 13.

4.1.1. Biodigestores alimentados com soro sem correção de pH (1 e 2)

Os biodigestores tratados com soro de queijo sem correção de pH e mantidos a 35°C (1 e 2) iniciaram o 1º TR com uma acidez volátil de 500 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$. No final deste TR, onde a alimentação foi efetuada em intervalos de 8 h a acidez foi de 800 mg/l. No 2º TR com intervalo de alimentação de 12 h (carga de DQO dividida em duas vezes) a acidez começou a aumentar gradualmente, alcançando níveis no final deste intervalo de 2.500 mg/l. No 3º TR com a carga total de DQO foi dividida em quatro vezes (intervalos de alimentação de 6h), a acidez continuou a crescer e no final do 4º TR onde a carga de DQO diária foi adicionada de uma só vez, a acidez alcançou níveis entre 6.500-6.900 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$.

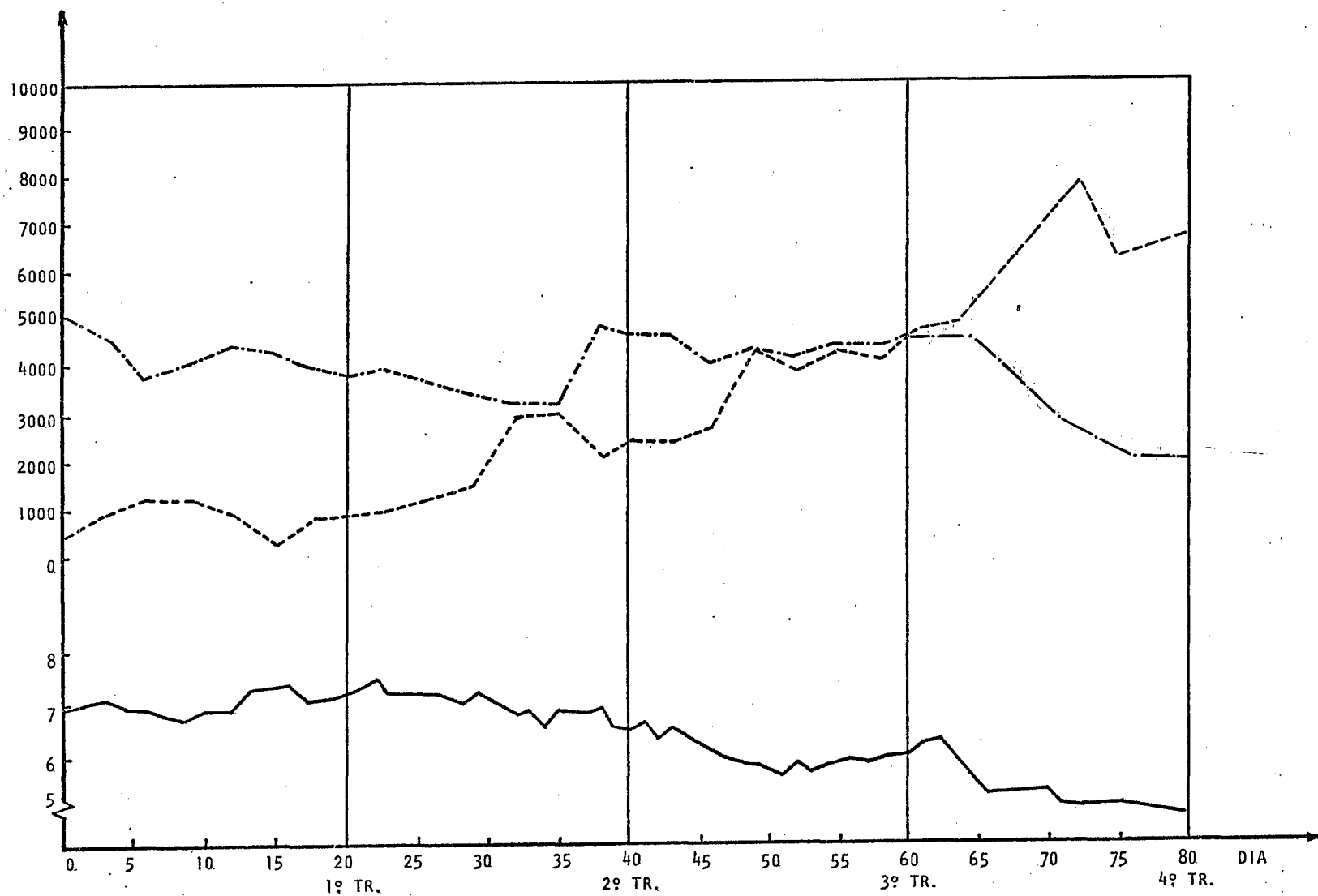


Figura 8: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH/l}$ (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO_3/l (-.-.-) do biodigestor 1.

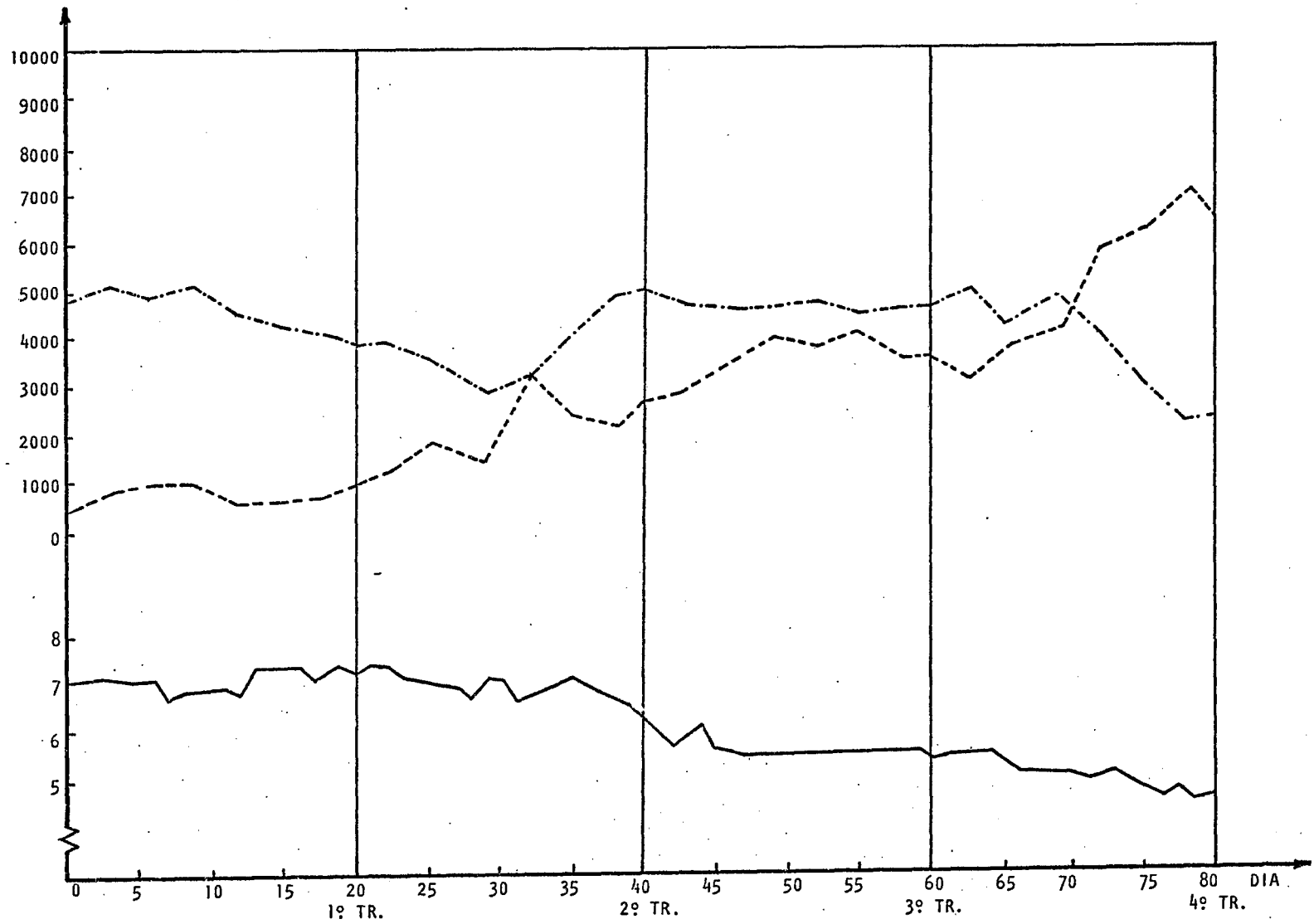


Figura 9: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em CH₃COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO₃/l (---) do biodigestor 2.

De acordo com citação de SOUZA (1982a), nessas condições de acidez o processo não seria afetado desde que o pH não diminuísse, o que não ocorreu devido a produção de ácidos voláteis e possivelmente a alcalinidade do sistema não foi suficientemente elevada para evitar a queda do pH observado nesse tratamento.

No início do 3ºTR (40º dia) devido ao abaixamento do pH, além das faixas ideais 6,8-7,2 (McCARTY & McKYNNY, 1961) embora a acidez volátil (2.300-2.600 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$) não tivesse ainda atingido os limites de intolerância, esta tornou-se tóxica ao sistema, provocando a paralização completa da atividade microbiana nestes dois biodigestores, o que segundo McCARTY & McKYNNY (1961) é devido ao acúmulo desses ácidos no meio, cujo efeito se faz sentir principalmente sobre as bactérias metanogênicas, uma vez que as bactérias acidogênicas de acordo com a citação de DE LA TORRE & GOMA (1981) podem suportar até 40.000 mg de acidez volátil expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$.

Por outro lado, a alcalinidade no 1ºTR inicialmente foi de 5.000 e 4.700 mg CaCO_3/l (1 e 2), e no final deste a alcalinidade decresceu acentuadamente. No 2º e 3ºTR a alcalinidade nos biodigestores oscilava entre 3.800-4.500 mg CaCO_3/l , decrescendo bastante no 4ºTR, chegando no final deste a 2.300 mg CaCO_3/l .

SOUZA (1982a) cita que um valor de alcalinidade de 2.500 a 5.000 mg CaCO_3/l é desejável para o bom funcionamento da biodigestão, pois confere um poder de tamponamento ao meio em digestão. Entretanto, estes níveis podem variar com o substrato empregado. Por exemplo, VIEIRA & SOUZA (1981) citam que no caso do lodo primário, a faixa de alcalinidade ótima situa-se entre 2.500-4.000 mg CaCO_3/l , enquanto que para o restilo (resíduo da destilação do álcool) a alcalinidade deve variar entre 3.000 e 6.000 mg CaCO_3/l . Já SILVA (1977) cita que a alcalinidade deve ser sempre superior à 1.500 mg CaCO_3/l .

Desta forma, nas condições do experimento sem correção do pH do soro de alimentação, ocorreu um aumento muito rápido da acidez volátil no 2º TR e a alcalinidade não foi suficiente para tamponar o meio nos próximos TR e criar boas condições para o desenvolvimento da biodigestão, o que vem de encontro com o citado por SILVA (1977), que para um bom desempenho da digestão anaeróbica de esgoto, a acidez volátil deve se encontrar na faixa de 500 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$, e um aumento de 300 mg/l no teor normal de acidez demonstra deficiência no tratamento.

4.1.2. Biodigestores alimentados com soro com pH corrigido a 5,5 (3 e 4)

Os biodigestores tratados com soro de queijo

com pH corrigido a 5,5 com bicarbonato de sódio e mantidos a 35°C, iniciaram o 1ºTR com uma concentração de ácidos voláteis semelhantes aos biodigestores 1 e 2 (600 e 360 mg/l) e no final deste TR a acidez oscilava entre 1.250-1.400 mg/l. A carga total de DQO neste TR foi dividida em três parcelas, adicionadas em intervalos de 8 horas.

No início do 2ºTR (alimentação de 12 em 12 horas) a acidez cresceu lentamente chegando alcançar níveis neste intervalo de 3.580 e 2.050 mg/l. No 3ºTR em que a carga total foi adicionada parceladamente de 6 em 6 horas, a acidez permaneceu semelhante ao 2ºTR enquanto que no 4ºTR onde a carga total de DQO foi adicionada de uma só vez, a acidez oscilou entre 5.500-6.000 mg CH₃COOH/l, como ocorrera no caso dos biodigestores 1 e 2 sem correção do pH inicial do soro, ocorrendo também praticamente uma paralização da atividade microbiana causada pelo acúmulo de acidez no meio, como explicado anteriormente.

Em relação à alcalinidade, no 1ºTR não houve grande modificação, onde esta alcançou níveis de 5.500 mg CaCO₃/l e, no final do 2ºTR a alcalinidade se elevou para 7.000 e 7.500 mg CaCO₃/l (biodigestor 3 e 4 respectivamente), fazendo com que a acidez do meio não afetasse o processo. No 3ºTR a alcalinidade não oscilou e no início do 4ºTR esta decresceu lentamente, chegando ao final deste a uma concentração equivalente a inicial (5.700-5.400 mg CaCO₃/l).

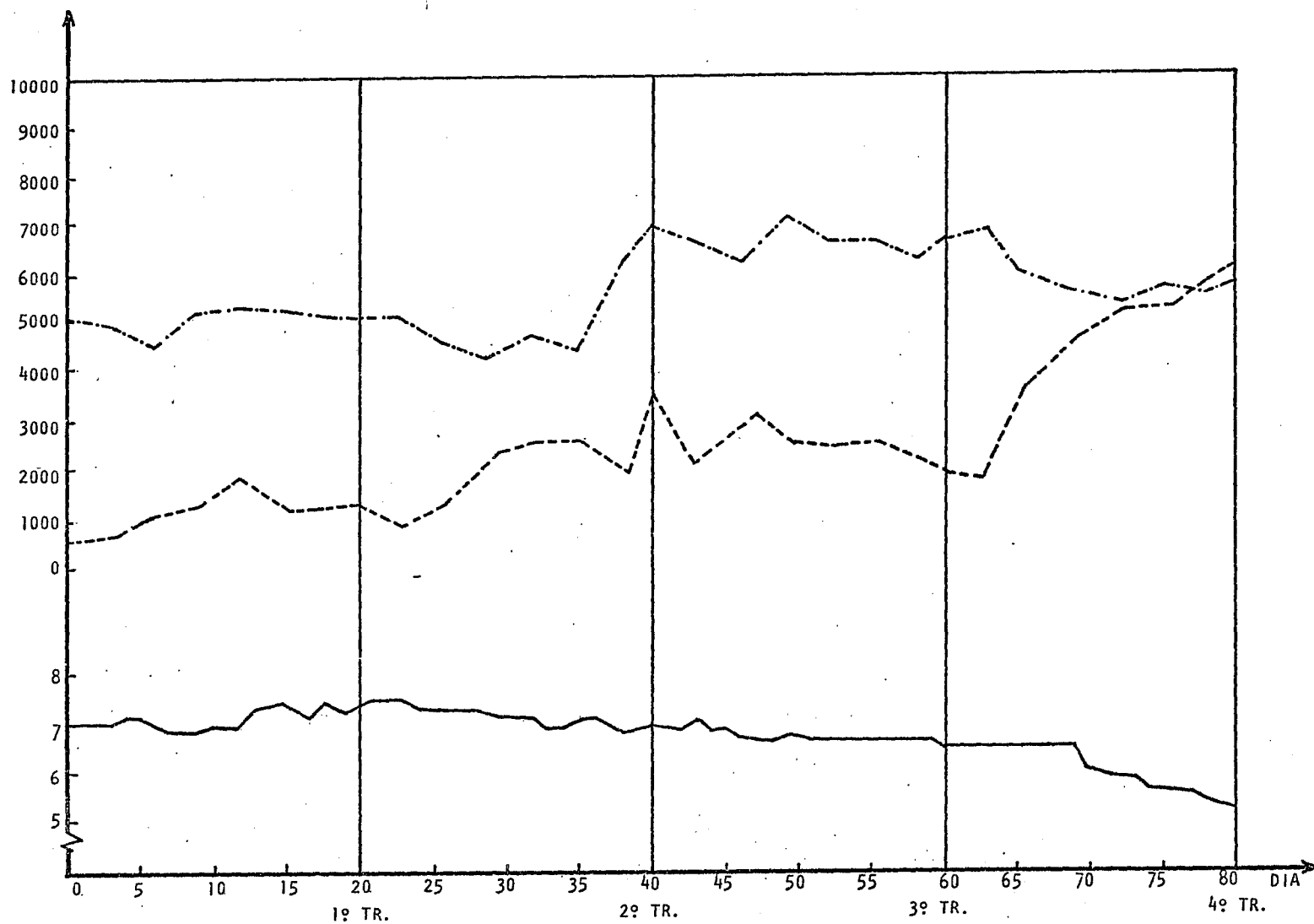


Figura 10: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH₃COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO₃/l (---) do biodigestor 3.

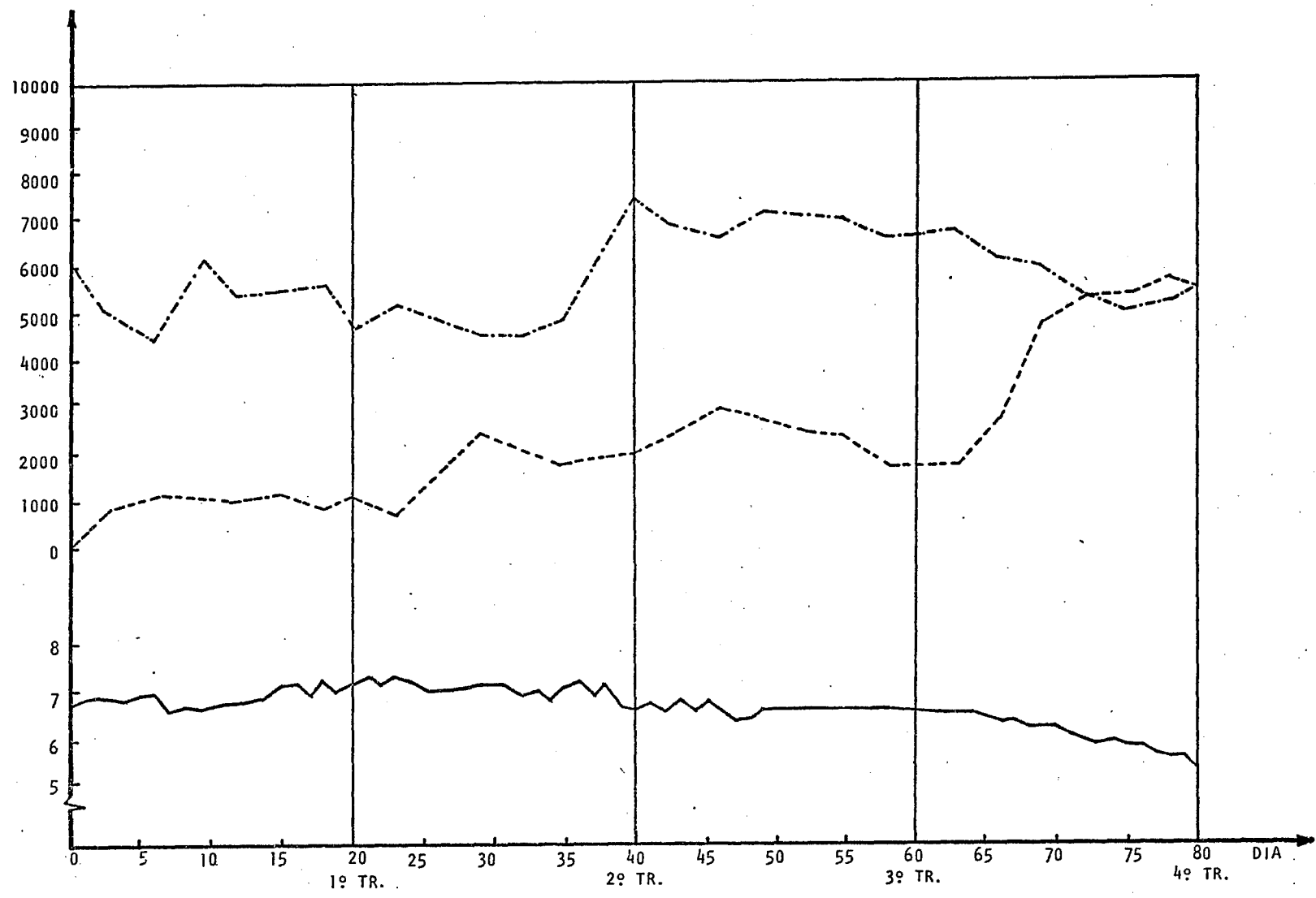


Figura 11: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH₃COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO₃/l (-.-.-) do biodigestor 4.

De acordo com a citação de SOUZA (1982a) valores de alcalinidade para um bom funcionamento do processo se encontram entre 2.500 a 5.000 mg CaCO_3/l , o que ocorreu até o final do 3ºTR. Entretanto, no 4ºTR, a faixa de alcalinidade situava-se entre as faixas ideais, mas a acidez aumentou muito rápido com a alimentação adicionada de uma só vez juntamente com o declínio do pH.

Assim, no 4ºTR mesmo com a correção do pH do soro de queijo a 5,5, não foi conseguido o tamponamento do meio devido a acidez tornar-se tóxica quando a carga foi adicionada de uma só vez.

4.1.3. Biodigestores alimentados com soro com pH corrigido a 6,5 (5 e 6)

Os biodigestores tratados com soro de queijo com correção de pH a 6,5 com bicarbonato de sódio e mantidos a 35°C , iniciaram o 1ºTR com uma acidez volátil semelhante aos tratamentos anteriores (500 e 700 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ -biodigestores 5 e 6 respectivamente) e no final deste tempo a acidez era de 2.000 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$. Neste intervalo (20 primeiros dias) a alimentação foi dividida em 3 partes (30-20-30) e adicionada em intervalos de 8 horas. O 2ºTR, onde o intervalo de alimentação foi de 12 horas, a acidez alcançou níveis de 3.300 a 3.700 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ respectivamente (5

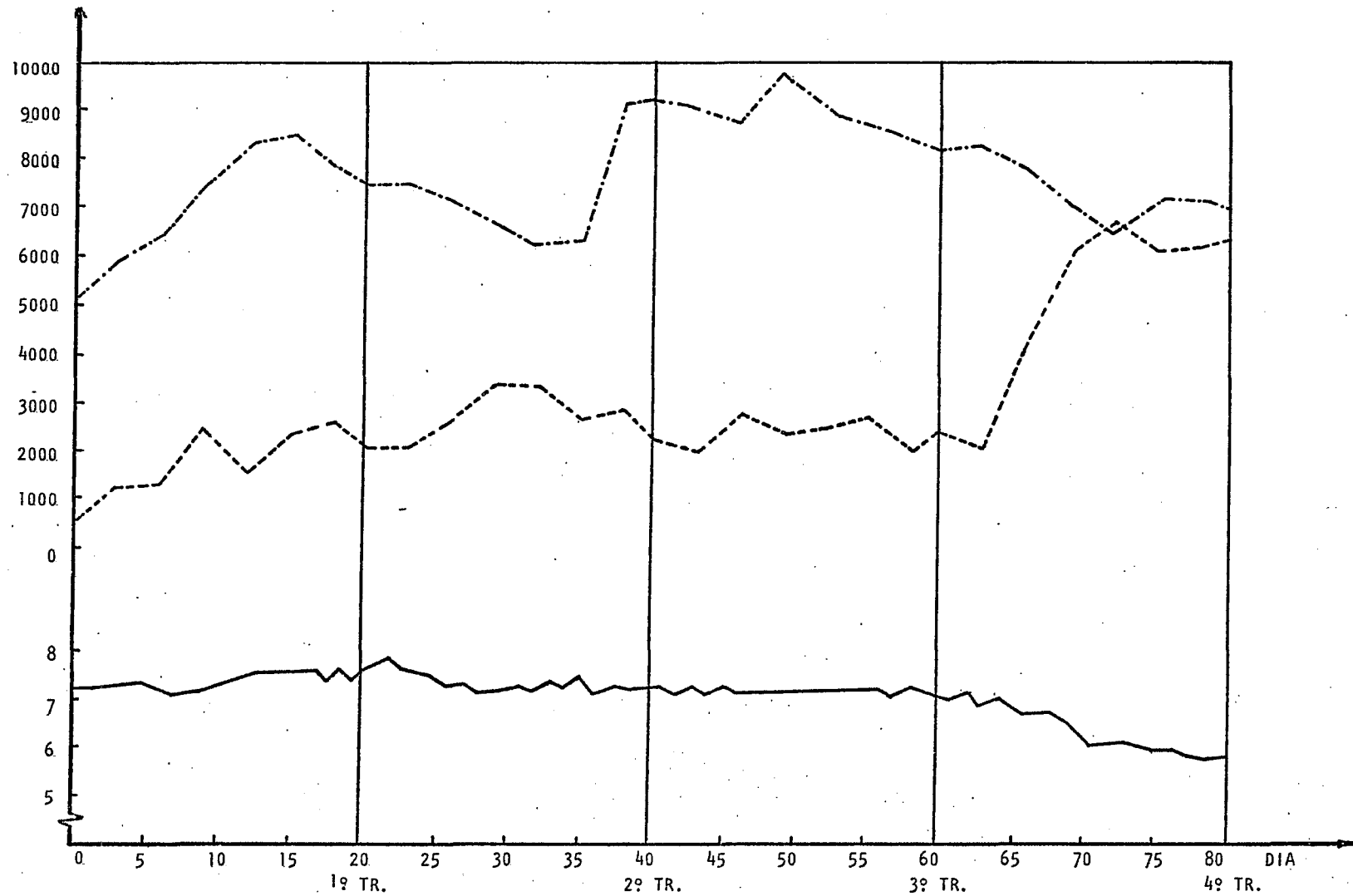


Figura 12: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg CH₃COOH/l (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO₃/l (-.-.-) do biodigestor 5.

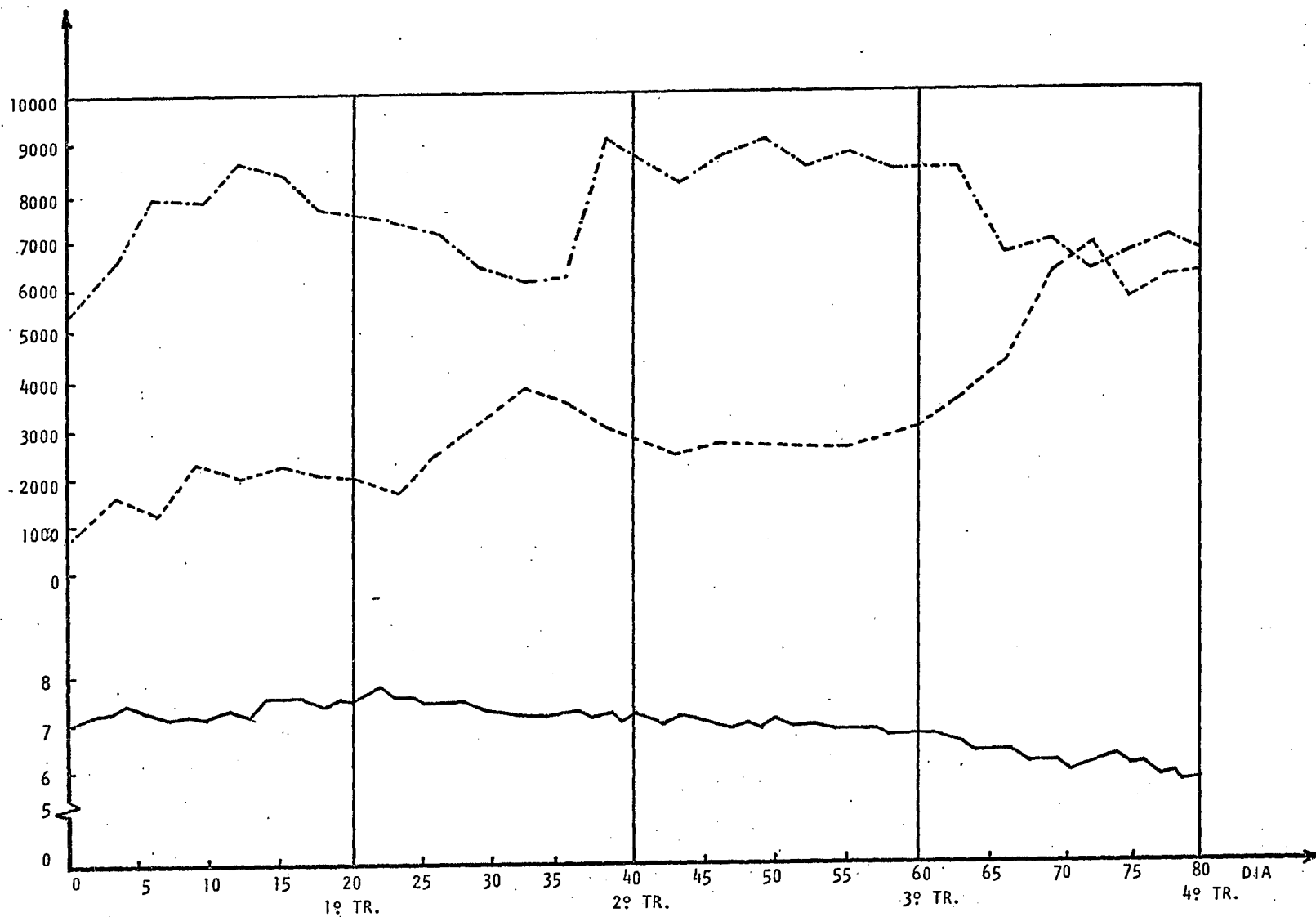


Figura 13: Valores de pH (—), acidez volátil expressa em mg $\text{CH}_3\text{COOH/l}$ (---) e alcalinidade expressa em mg CaCO_3 (---) do biodigestor 6.

e 6) e no final deste tempo esta se encontrava em aproximadamente 2.200-2.700 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$ (5-6). No 3ºTR a acidez não oscilou (intervalos de alimentação igual a 6 horas) e no 4ºTR a acidez cresceu rapidamente alcançando no final deste concentração de acidez de 6.150 mg $\text{CH}_3\text{COOH}/\text{l}$; com a carga adicionada de uma só vez.

Neste tratamento, a acidez volátil prejudicou a digestão anaeróbica quando ocorreu a queda do pH, pois mesmo encontrando-a nas faixas toleráveis esta tornou-se tóxica ao sistema como citado por McCARTY & MCKYNNY (1961). A queda do pH é explicada com a não divisão da carga orgânica adicionada, isto é, com a adição total da carga (5,38 g DQO/dia) a produção de ácidos foi rápida no início do tratamento e não conseguindo degradá-los até a adição subsequente, mesmo com níveis de alcalinidade elevados.

A alcalinidade inicial no 1ºTR oscilou entre 5.200-5.400 mg CaCO_3/l . Com a correção de pH do soro com bicarbonato de sódio a 6,5 a alcalinidade aumentou acentuadamente até o final do 2ºTR (9.000 mg CaCO_3/l) e não se alterou no 3ºTR. No final do 4ºTR a alcalinidade diminuiu e alcançando níveis de 6.900 e 6.600 mg CaCO_3/l para os biodigestores 5 e 6 respectivamente.

Assim, nas condições do experimento sem correção do pH do soro de alimentação, independente da subdivisão da carga de DQO adicionada diariamente, o acúmulo

de ácidos voláteis e a queda do pH dos biodigestores 1 e 2 no final do 2ºTR impediu o bom desempenho da digestão anaeróbica nos TR subsequentes, o que não ocorreu com os biodigestores 3, 4, 5 e 6 onde houve uma correção inicial do pH do soro de alimentação. Nesses tratamentos até o final do 3ºTR (onde houve o parcelamento da carga de DQO adicionada) foi conseguido o tamponamento do meio, o que não ocorreu no 4ºTR onde a carga de DQO não foi parcelada e a concentração de ácidos desses biodigestores praticamente paralizou a digestão anaeróbica.

4.2. Eficiência da Digestão Anaeróbica do Soro de Queijo em Relação à Remoção de DQO e Produção de Biogás

A eficiência da biodegradação do material orgânico do soro de queijo foi caracterizada pela análise de DQO no efluente centrifugado. Os resultados obtidos no experimento encontram-se nas Tabelas 10, 11 e 12 do Apêndice e nas Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

A produção de biogás (l biogás/dia) obtida é encontrada nas Tabelas 13, 14, 15 e 16 do Apêndice e Figuras 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

Segundo citações de GRYSCHK & BELO (1983) o rendimento da digestão anaeróbica é grandemente afetado pela

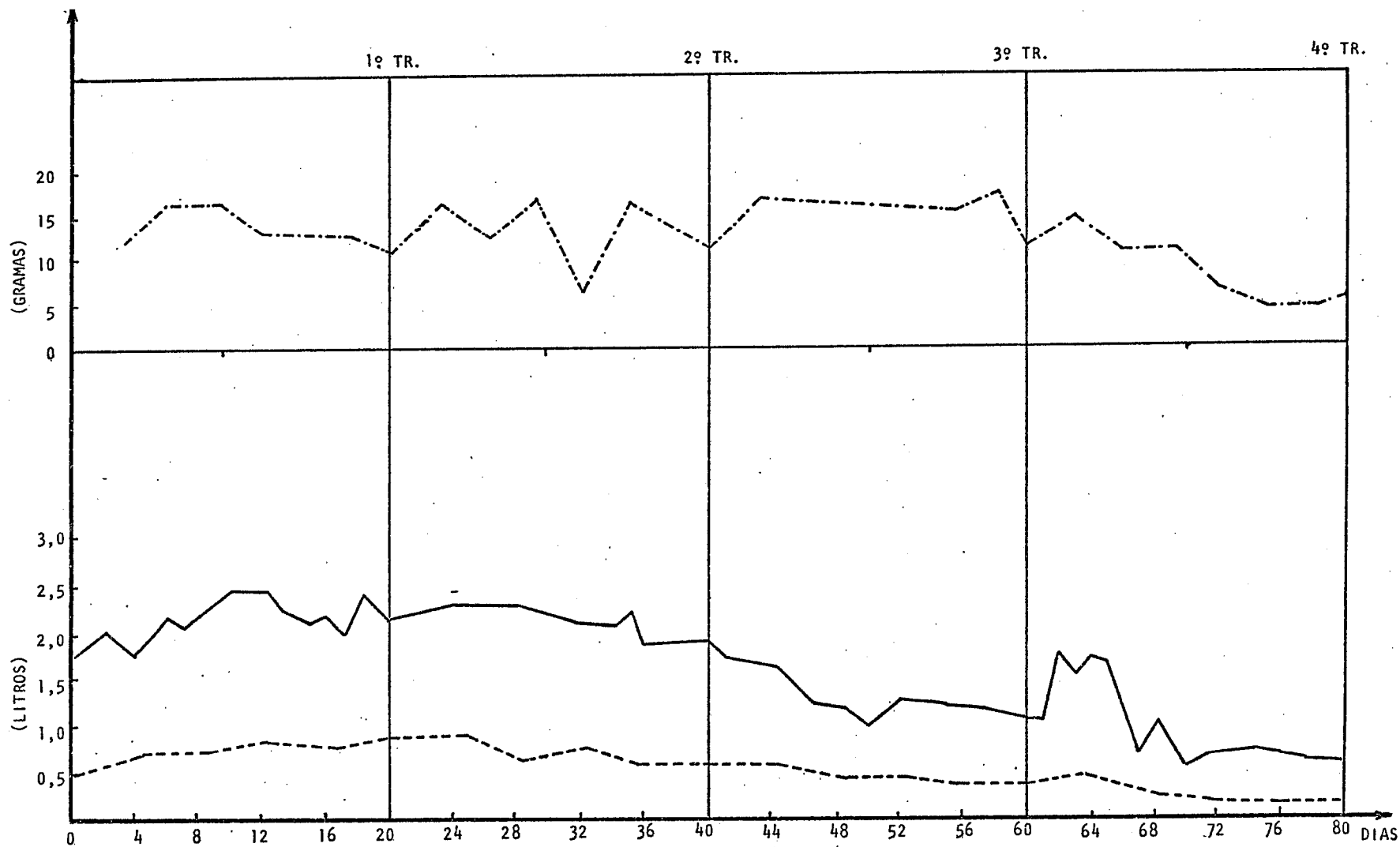


Figura 14: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 1.

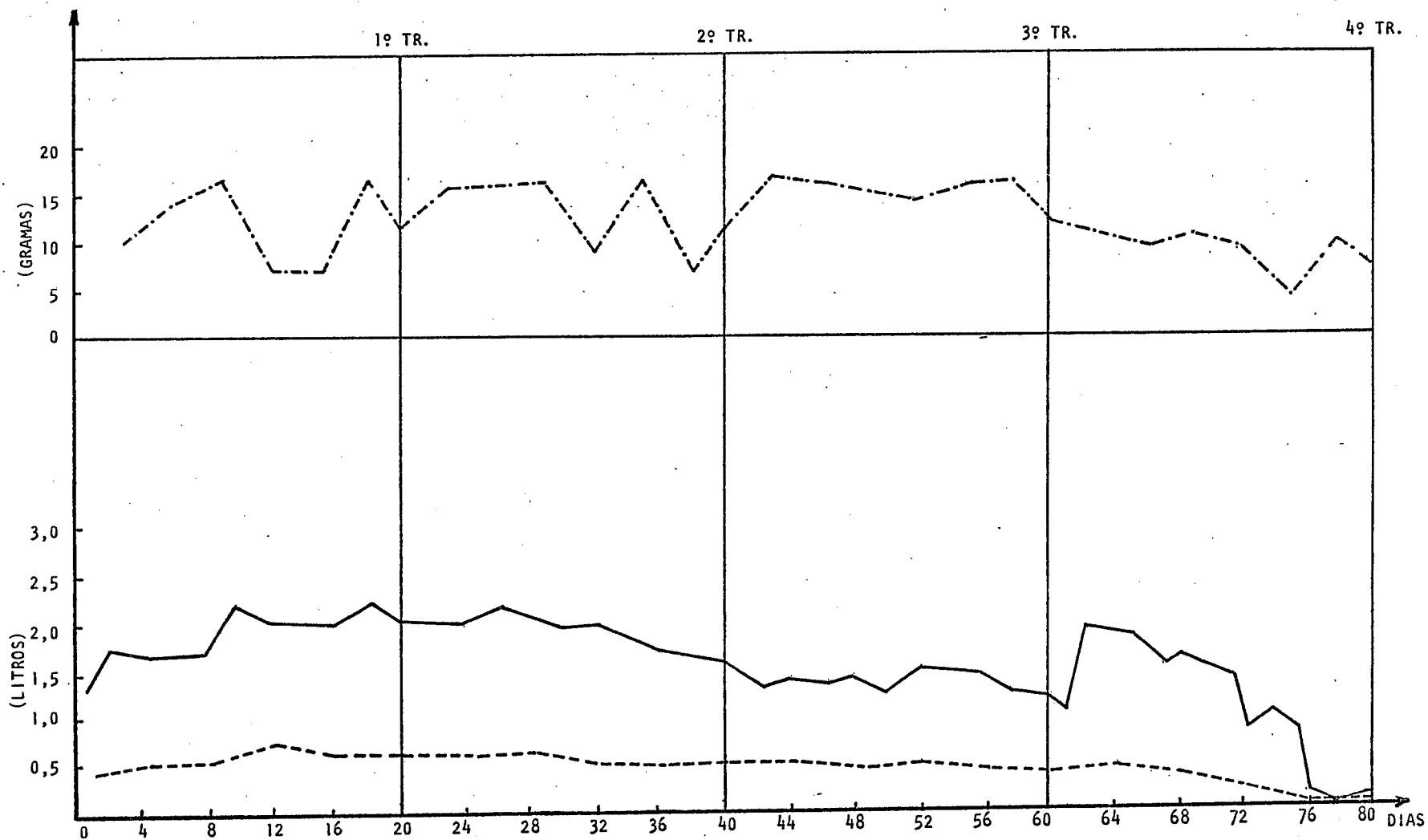


Figura 15: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, biodigestor 2.

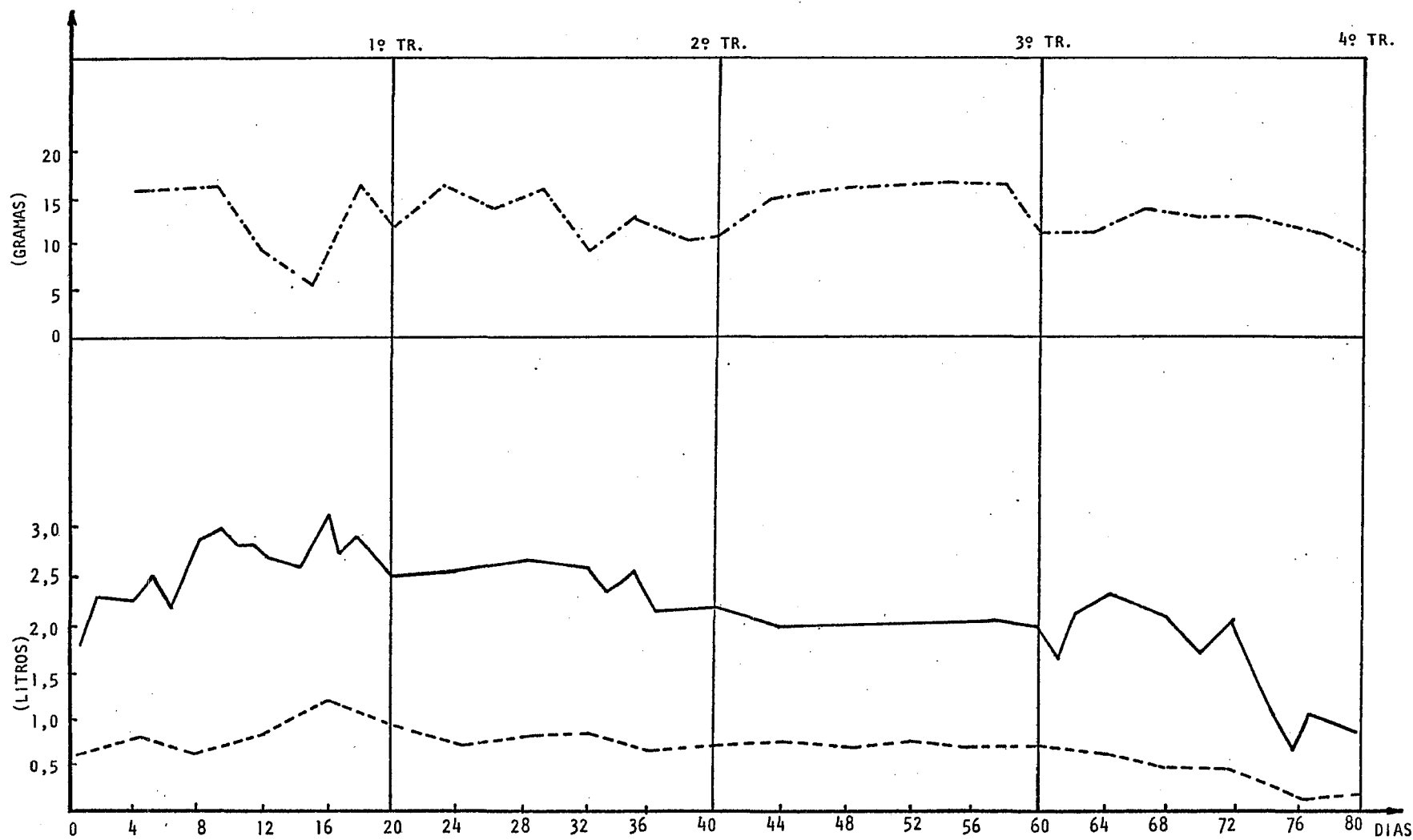


Figura 16: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 3.

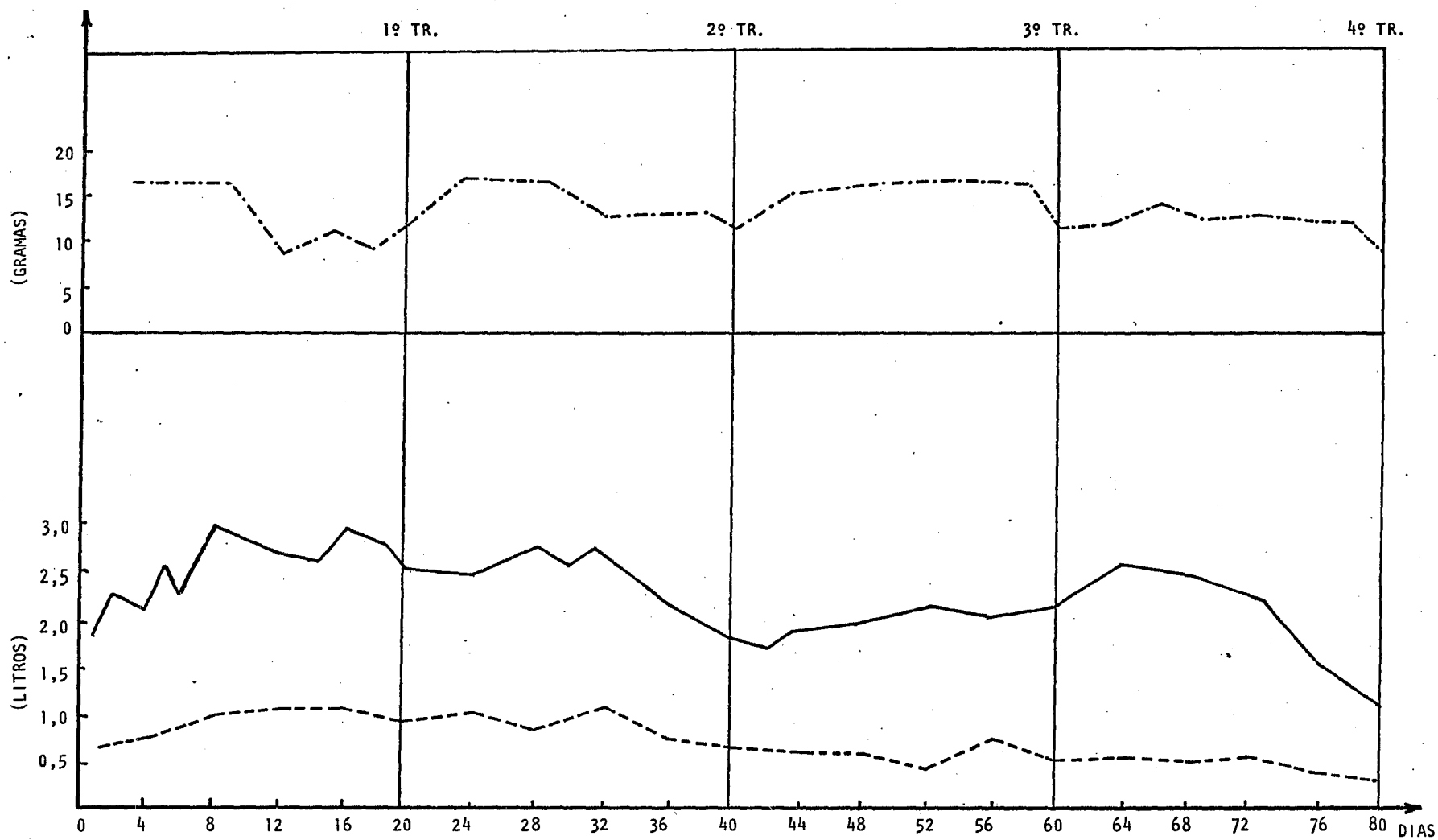


Figura 17: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 4.

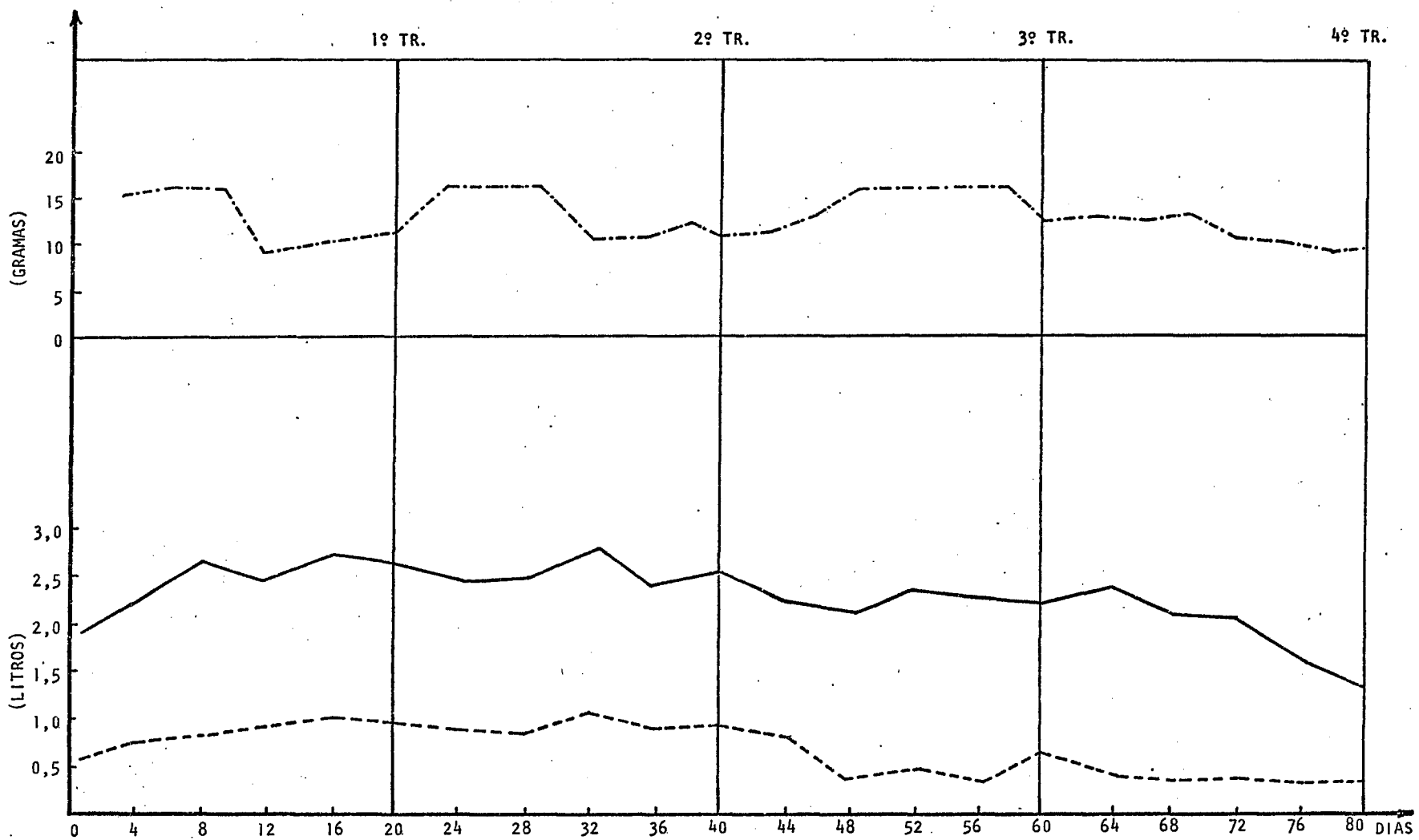


Figura 18: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, no biodigestor 5.

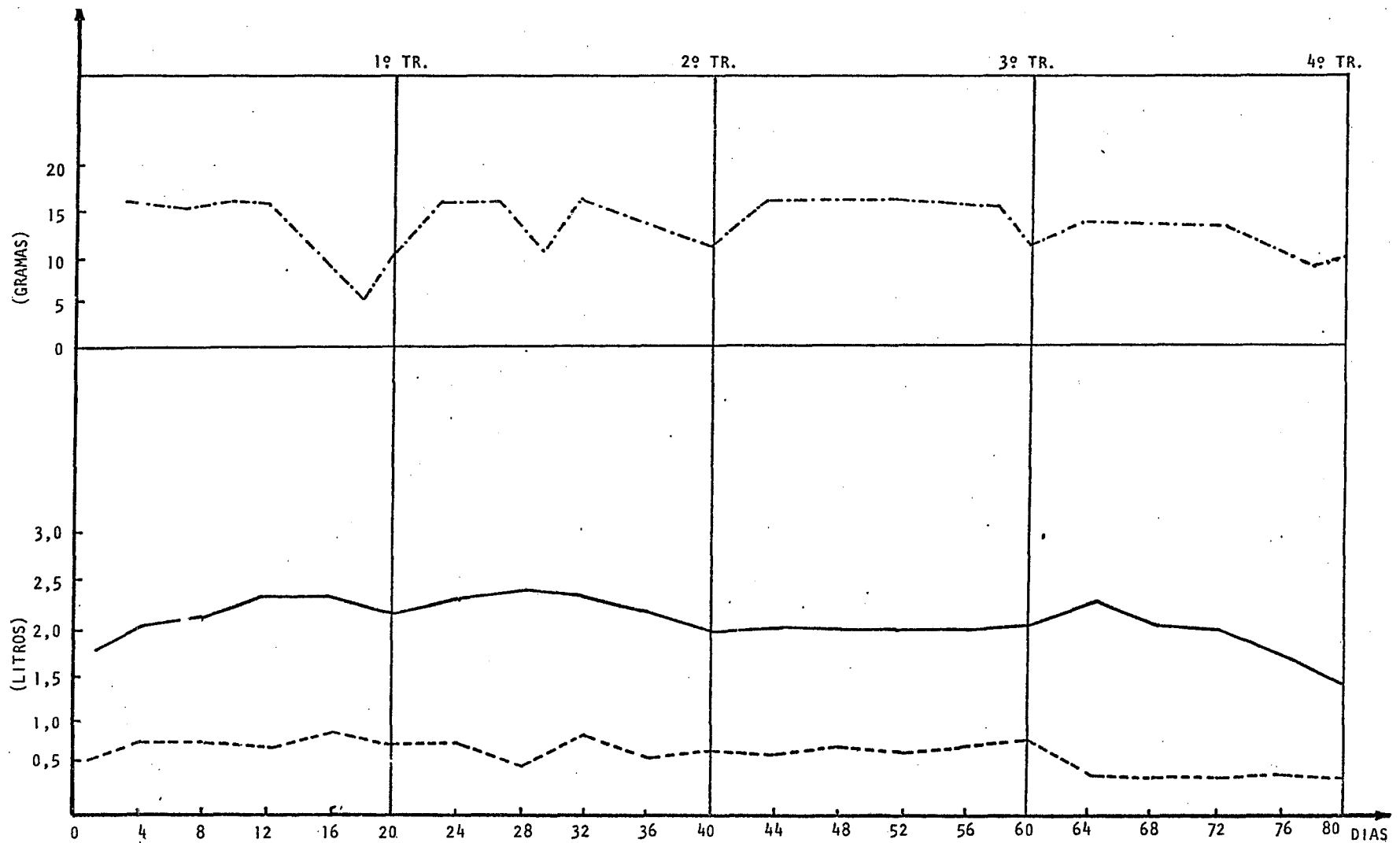


Figura 19: Produção de biogás (—), teor de metano no biogás (---) e grama de DQO removida em função do tempo (-.-.-) utilizando 5,38 g DQO/dia de soro, biodigestor 6.

composição química do resíduo. Como exemplo os mesmos autores citam que, resíduos contendo baixa digestibilidade como resíduos fibrosos (bagaço de cana e resíduos agrícolas) apresentam potenciais mais reduzidos quando comparado com resíduos contendo alta digestibilidade (resíduos de matadouros e laticínios).

A digestão anaeróbica do soro de queijo, um resíduo de alta digestibilidade, é também afetada pelo tipo de biodigestor empregado (SOUZA, 1982a).

Como exemplo, utilizando biodigestores não convencionais como o caso de LO & LIAO (1986a e b) (biodigestores de escala laboratorial de contato) conseguiram remoções de DQO que variavam de 76 a 93%; já HOLDER & SEWARDS, citado por BARFORD (1986) utilizando tratamento similar ao citado anteriormente obtiveram remoções de 90%. HICKEY & OWENS (1980) conseguiram remover 83,6% de DQO utilizando uma carga de 13,4 kg DQO/m³.dia no TR = 1,4 dia em biodigestores de leite fluidizado.

Comparando os resultados obtidos de remoção de DQO com o tipo de biodigestor utilizado neste experimento (Figura, 6), as remoções de DQO variaram bastante e os biodigestores (1 e 2) que foram alimentados com soro de queijo sem correção de pH foram os que obtiveram menor remoção de DQO (Tabela 20).

Os melhores rendimentos da digestão anaeróbica expressos em l de biogás produzido/g DQO removida, obtidos nos biodigestores foram encontrados nos 1º e 2ºTR como mostram as Tabelas 17, 18 e 19, onde a carga de alimentação foi parcelada em 3 e 2 vezes respectivamente. No 3ºTR a remoção de DQO alcançada foi bastante elevada, mas o rendimento em biogás neste TR foi baixo (Tabela 20). Isto poderia ser fundamentado no fato de que, com o parcelamento da carga de alimentação em 4 vezes, isto é, com a abertura dos biodigestores, o contato do material digerido com o ar foi bem maior do que nos TR anteriores.

No 4ºTR a remoção de DQO decresceu acentuadamente em todos biodigestores mais o rendimento em biogás melhorou quando comparado com o 3ºTR, pois a carga de DQO foi adicionada de uma só vez, o que levou a uma maior condição de anaerobiose do sistema e conseqüentemente uma melhoria na atividade das bactérias metanogênicas.

5. CONCLUSÕES

Nas condições do presente trabalho os resultados encontrados para os quatro tempos de retenção e sistemas de alimentação levam as seguintes conclusões:

1) Os sistemas de alimentação utilizados no presente trabalho prejudicaram o desenvolvimento da digestão anaeróbica, afetando as condições de anaerobiose, principalmente quando a carga total de DQO (39TR) fora parcelada, com alimentação de 6 em 6 horas.

2) A alimentação de uma só vez, da carga total de DQO (49TR) por outro lado, provocou um aumento muito rápido da concentração de acidez volátil o que levou consequentemente a uma diminuição drástica da digestão anaeróbica e consequentemente diminuição da produção de biogás.

3) Comparando-se a remoção de DQO em relação à correção do pH, verifica-se que com correção do pH do sorro de alimentação houve uma maior eficiência na remoção de DQO.

4) A correção do pH do soro de alimentação, independentemente do sistema de alimentação, aumentou a produção de metano.

5) Não foram constatadas diferenças na produção de metano para os dois níveis de correção do pH (5,5 e 6,5) do soro de alimentação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ORGANIZATION. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*, 14 ed. Washington, D. C. APHA. American Public Health Organization, 1976.

ARAÚJO, E.H.; MELO, G.S.; OLIVEIRA, I. Operação de biodigestor anaeróbico em escala de bancada para produção de biogás a partir de soro de queijo. *Revista de Microbiologia*, São Paulo, 17(2): 155-161, 1986.

BARBOSA, R.A. Novas Tecnologias em Biodigestores. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO DA UNIVERSIDADE DE VIÇOSA, 5. Viçosa, 1982. *Anais*, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1986.

BARFORD, J.P.; CAIL, R.G.; CALLENDER, I.J.; FLOYD, E.J. Anaerobic Digestion of High-Strength Cheese Whey Utilizing Semicontinuous Digesters and Chemical Flocculant Addition. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, 28: 1601-07, 1986.

- BARKER, H.A. *Lectures in Microbial Biochemistry Bacterial Fermentations*. New York, John Wiley e Sons, Inc. London Chapman e Hall Ltda., CIBA, 1956.
- BATISTA, L.F. Construção e operação de biodigestor modelo Indiano. *Energia - Fontes Alternativas*, São Paulo, 3(15): 38-56, 1981.
- BOENING, P.H. & LARGEN, V.F. Anaerobic Fluidezed Bed Whey Treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, 24(11): 2539-56, 1982.
- BRYANT, M.P. Microbial methane production. Theoretical Aspects. *Journal of Animal Science*, New York, 48(1): 193-201, 1979.
- BYLUND, G. Tratamento e utilização do soro. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, Juiz de Fora, 30 (179): 29-43, 1975.
- CEREDA, M.P.; FLORS, A.; VALLES, S.; ALBEROA, J. Tratamiento anaerobio en dos fases de suspensiones amiláceas. I. Fase acidogênica. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, Madrid, 26(1): 101-08, 1986.
- COSTA, C. *Biotecnologia e a Produção de Energia*, Piracicaba, E.S.A. "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, 1986, 183p.

- COSTA, S.R.A. & LACAIVA, P.M. Observações preliminares da digestão anaeróbica do soro de queijo. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, 5. São Carlos, 1986. *Anais*, São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 1986. 1v.
- CRAVEIRO, A.M. Produção de biogás. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO DE RECIFE. 4. Recife, 1986. *Anais*, Universidade Federal de Recife, 1986. 1v.
- DANESE, M. Utilização do biogás. *Energia - Fontes Alternativas*, São Paulo, 3(15): 14-19, 1981.
- DE LA TORRE, I. & GOMA, G. Characterization of Anaerobic Microbial Culture with High Acidogenic Activity. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, 23: 185-199, 1981.
- DITCHFIELD, P. Industrial wastewater treatment: the anaerobic alternative. *Trends Biotechnology*, Amsterdam, p. 309-313, DEC, 1986.
- FERRAT, A. Como valorizar o subproduto das fábricas de queijos, o "Lacto-Soro". *Boletim do Leite*, Rio de Janeiro, 618: 32-38, 1980.
- FOLLMANN, H. & MÄRKL, H. pH-statisches Verfahren zur kontinuierlichen Anaeroben Vergärung von Hochbelasteten Abwässern zu Methan 2. Experimentelle Untersuchungen und Verifizierung des Konzeptes an Beispiel der Molke. *Mil*

Chwissen schaft, Hermann, 34(7): 393-396, 1979.

GONÇALVES, A.C.R. A potencialidade de outros substratos para a digestão anaeróbica. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO, 5., Viçosa, 1982. *Anais*, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 1v.

GRÝSCHEK, J.M. & BELO, F.R. Produção e Uso do Gás Metano na Agricultura e Agro-indústria, E.S.A. "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, 1983. 15p.

HARISCHANDRA, H.C. & SAVENA, K.L. Anaerobic Digestion of Cheese Whey Utilizing Sistem of Agitation in Digester. *Environmental Health*, 11(1): 41-50, 1969.

HICKEY, R.F. & OWENS, R.W. Third Symposium Biotechnology in Energy Production and Conservation, Gatlinburg, Tennessee, 1981.

HUGHES, D.E. What is anaerobic digestion? On over view. In: STAFFORD, D.A; WHEATLEY, B.I.; HUGHES, D.E. *Anaerobic Digestion*, London, Applied Science Publishers, 1980, 1-14.

IZAGUIRRE, M.E. & CASTILLO, F.L. Selection of lactose fermenting yeast for ethanol production from whey. *Biotechnology Letters*, London, 4: 251, 1982.

- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL DE MINAS GERAIS. A Industrial de Laticínios de Minas Gerais, Belo Horizonte, INDI, 1980, 1v.
- KOSIKOWSKI, F. Greater utilization of whey powder for human consumption and nutrition. *Journal of Dairy Science*, New York, 50: 1343-45, 1967.
- KUBIAK, C. & DUBUIS, T. Valorização dos dejetos e dos efluentes agrícolas, industriais e domésticos. In: SCRIBAN, R., *Biotecnologia*, Manole, 1985, 400-26.
- LO, K.V. & LIAO, P.H. Digestion of cheese whey with anaerobic rotating biological contact reactores. *Biomass*, 10: 243-252, 1986a.
- LO, K.V. & LIAO, P.H. Two-stage anaerobic digestion of cheese whey. *Biomass*, 10: 319-322, 1982b.
- MAH, R.A.; WARD, D.M.; BARESI, L. & GLASS, T.L. Biogenesis of methane. *Annual Review of Microbiology*, 31: 309-342, 1977.
- MCCARTY, P.L. & MCKINNEY, R.E. Volatile acid toxicity in anaerobic digestion. *Journal W.P.C.F.*, Washington, 33 (3): 223-32, 1961.
- PERES, C.S. *Microbiologia da Digestão Anaeróbica*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, Divisão de Química, 1982. 40p. (mimeografado).

- REESEN, L. & STRUBE, R. Complete utilization of whey for alcohol and methane production. *Process Biochemistry*, London, p.21-24, nov., 1979.
- SILVA, N.A. O biogás e o biofertilizante no balanço energético do Brasil. *Revista DAE*, São Paulo, 44(136): 22-29, 1984.
- SILVA, M.O.S.A. *Análises Físico-Químicas para Controle de Estações de Tratamento de Esgotos*. ABES/BNH/CETESB, 1977, 225p.
- SOUZA, M.E. *Fatores que Influenciam a Digestão Anaeróbica*. São Paulo, CETESB, 1982a. 30p. (mimeografado).
- _____. *Problemática da Digestão Anaeróbica dos Resíduos Industriais*. São Paulo, CETESB, 1982b. 35p. (mimeografado).
- SUTTON, P.M. & LI, A. Proceedings of 36th. Industrial Waste Conference, Purdue University, 1981.
- TOERIEN, D.F. & HATTINGH, W.H. Anaerobic Digestion. 1. The microbiology of anaerobic digestion. *Water Research*, 3: 385-396, 1969.
- VIEIRA, M.A.; BRANDÃO, S.C.C.; PINHEIRO, A.J.R.; GUIMARÃES, W.R. Conservação do soro de queijo minas com peróxido de hidrogênio. *Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes*, Juiz de Fora, 40(240): 17-28, 1985.

- VIEIRA, S.M.M. & SOUZA, M.E. *Métodos Analíticos para o Acompanhamento da Biodigestão*. São Paulo, CETESB, 1981. 11p. (mimeografado).
- WOLFE, R.S. Microbial Formation of Methane. In: *Advances in Microbial Physiology*, 6, Academic Press, London, 1971. p.107-146.
- ZEIKUS, J.G. The biology of methanogenic bacteria. *Bacteriological Reviews*, Washington, 40: 514-541, 1977.
- ZEIKUS, J.G. Microbial populations in digesters. In: STAFFORD, D.A.; WHETLEY, B.Y. & HUGHES, D.E. *Anaerobic Digestion*, London, Applied Science Publishers, 1980. p.61-89.
- ZEIKUS, J.G. Microbial ecophysiology of whey biomethanation: Intermediary metabolism of lactose degradation in continuous culture. *Applied and Environmental Microbiology*, Baltimore, 51(1): 180-187, 1986.
- ZINDER, S.H. Microbiology of anaerobic conversion organic wastes to methane: Recent developments. *ASM News*, 50 (7): 294-298, 1984.
- _____. Will a recombinant DNA yeast be able to solve whey disposal problems? *Trends Biotechnology*, Amsterdam, 4 (5): 107-108, 1986.

A P E N D I C E

Tabela 7: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 1 e 2 mantidos a 35°C.

Tempo retenção	Dia	pH biodig. 1	pH biodig. 2	Acidez volátil		Alcalinidade	
				biodig.1	biodig.2	biodig.1	biodig.2
Intervalo de alimentação (8 h)	0º	7,02	7,08	484,8	484,8	5.051,2	4.706,2
	3º	7,08	7,11	727,2	848,4	4.706,8	5.051,2
	6º	6,84	7,05	1212,0	969,6	3.788,4	3.903,2
	9º	6,82	6,84	1212,0	969,6	4.160,0	5.096,0
	12º	6,84	6,83	886,2	633,0	4.368,0	4.576,0
	15º	7,31	7,30	379,4	633,0	4.264,0	4.368,0
	18º	7,10	7,32	759,6	759,6	3.952,0	4.160,0
	20º	7,28	7,28	759,6	886,2	3.848,0	3.848,0
Intervalo de alimentação (12 h)	23º	7,26	7,08	886,2	1392,6	3.848,0	3.848,0
	26º	7,13	6,92	1139,4	1899,0	3.640,0	3.536,0
	29º	7,10	6,99	1407,5	2431,1	3.328,0	3.432,0
	32º	6,77	6,69	2942,9	3326,7	3.120,0	3.224,0
	35º	6,81	6,95	2942,9	2431,1	3.120,0	3.952,0
	38º	6,88	6,60	2047,2	2303,1	4.822,4	4.822,4
	40º	6,40	6,10	2303,1	2686,9	4.671,4	4.973,1
Intervalo de alimentação (6 h)	43º	6,40	5,70	2303,1	2814,9	4.521,0	4.671,7
	46º	5,87	5,48	2559,0	3582,6	4.068,9	4.521,0
	49º	5,60	5,43	4350,3	3966,5	4.219,6	5.123,8
	52º	5,56	5,39	4094,4	3838,5	3.848,0	5.123,8
	55º	5,58	5,36	4350,3	3966,5	4.219,6	4.973,1
	58º	5,73	5,35	4350,3	3582,6	4.068,0	4.521,0
	60º	5,74	5,34	4521,0	3582,6	4.521,0	4.521,0
Intervalo de alimentação (24 h)	63º	5,80	5,43	4521,0	3073,6	4.068,0	4.972,0
	66º	5,17	5,17	5606,0	3797,6	4.068,0	4.294,0
	69º	5,00	4,79	6871,9	3978,5	3.390,0	4.746,0
	72º	4,68	5,06	7776,1	5786,9	2.559,0	3.955,0
	75º	4,67	4,72	6329,4	6148,6	2.373,0	2.938,0
	78º	4,59	4,40	6510,2	6871,9	2.260,0	2.260,0
	80º	4,51	4,38	6871,9	6510,2	2.373,0	2.260,0

Tabela 8: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 3 e 4 mantidos à 35°C

Tempo retenção	Dia	pH		Acidez volátil		Alcalinidade	
		Biodig.3	biodig.4	Biodig.3	Biodig.4	Biodig. 3	Biodig.4
Intervalo de alimentação (8 h)	0º	7,04	7,01	606,0	363,8	5.051,2	6.199,2
	3º	6,98	7,10	727,2	969,6	4.936,4	5.166,0
	6º	6,99	7,05	1.212,0	1.212,0	4.477,2	4.592,0
	9º	6,84	6,92	1.333,2	1.212,0	5.200,0	6.344,0
	12º	6,85	6,99	1.899,0	1.139,4	5.304,0	5.512,0
	15º	7,36	7,38	1.239,4	1.266,0	5.200,0	5.512,0
	18º	7,35	7,39	1.266,0	1.012,8	5.096,0	5.200,0
	20º	7,32	7,38	1.392,6	1.266,0	4.992,0	4.888,0
Intervalo de alimentação (12 h)	23º	7,37	7,39	886,2	759,6	4.992,0	5.304,0
	26º	7,23	7,21	1.392,6	1.645,8	4.680,0	4.888,0
	29º	7,24	7,29	2.303,1	2.559,0	4.264,0	4.576,0
	32º	6,98	7,14	2.559,0	2.175,1	4.680,0	4.576,0
	35º	6,95	7,27	2.559,0	1.919,3	4.368,0	4.992,0
	38º	6,71	7,28	1.919,3	2.047,2	6.329,4	6.622,0
	40º	6,86	6,84	3.582,6	2.047,2	6.932,2	7.535,0
	Intervalo de alimentação (6 h)	43º	6,95	6,87	2.175,1	2.559,0	6.630,8
46º		6,70	6,68	3.070,8	2.942,9	6.178,7	6.630,8
49º		6,66	6,76	2.559,0	2.814,9	7.082,9	7.233,6
52º		6,63	6,77	2.431,1	2.559,0	6.622,0	7.082,9
55º		6,58	6,80	2.559,0	2.431,1	6.622,0	6.968,0
58º		6,59	6,74	2.175,1	1.808,4	6.329,4	6.630,8
60º		6,52	6,72	1.919,3	1.808,4	6.630,8	6.630,8
Intervalo de alimentação (24 h)		63º	6,53	6,73	1.808,4	1.808,4	6.780,0
	66º	6,53	6,49	3.616,8	2.712,6	5.763,0	6.215,0
	69º	6,27	6,39	4.521,0	4.882,7	5.537,0	5.989,0
	72º	5,80	6,14	5.063,5	5.425,2	5.311,0	5.311,0
	75º	5,58	5,98	5.063,5	5.063,5	5.650,0	5.424,0
	78º	5,21	5,72	5.786,9	5.244,4	5.537,0	5.763,0
	80º	5,19	5,60	6.010,8	5.425,2	5.763,0	5.424,0

Tabela 9: Acidez volátil, alcalinidade e pH dos biodigestores 5 e 6 mantidos à 35°C

Tempo retenção	Dia	pH		Acidez volátil		Alcalinidade	
		Biodig.5	Biodig.6	Biodig.5	Biodig.6	Biodig.5	Biodig.6
				— mg ác.acético —		— mg CaCO ₃ /l —	
Intervalo de alimentação (8 h)	09	7,05	7,04	484,8	727,2	5.280,8	5.395,6
	39	7,20	7,19	1.212,0	1.575,6	5.854,8	6.314,0
	69	7,16	7,14	1.333,2	1.212,0	6.314,0	7.806,4
	99	7,06	7,10	2.424,0	2.302,8	7.384,0	7.696,0
	129	7,40	7,18	1.519,2	2.025,6	8.320,0	8.528,0
	159	7,50	7,53	2.278,8	2.152,2	8.424,0	8.320,0
	189	7,50	7,33	2.532,0	2.025,6	7.800,0	7.592,0
	209	7,48	7,35	2.025,6	2.025,6	7.488,0	7.488,0
Intervalo de alimentação (12 h)	239	7,49	7,50	2.025,6	1.645,8	7.384,0	7.280,0
	269	7,32	7,36	2.532,0	2.405,4	6.968,0	6.968,0
	299	7,16	7,33	3.326,7	3.070,8	6.552,0	6.344,0
	329	7,08	7,10	3.198,7	3.710,5	6.132,0	6.032,0
	359	7,40	7,12	2.559,0	3.454,7	6.240,0	6.136,0
	389	7,19	7,06	2.686,9	2.942,9	0.042,0	9.042,0
	409	7,17	7,19	2.175,4	2.686,9	9.192,7	8.740,6
	Intervalo de alimentação (6 h)	439	7,20	7,09	1.919,3	2.431,1	9.042,0
469		7,10	6,91	2.686,9	2.559,0	8.740,6	8.740,6
499		7,13	6,91	2.303,1	2.559,0	9.795,5	9.042,0
529		7,09	6,89	2.431,1	2.559,0	8.969,0	8.430,0
559		7,06	6,78	2.559,0	2.559,0	8.740,6	8.740,6
589		7,08	6,72	1.919,3	2.686,9	8.430,0	8.430,0
609		7,00	6,74	2.431,1	2.942,9	8.137,8	8.430,0
Intervalo de alimentação (24 h)		639	6,83	6,49	1.989,2	3.466,0	8.249,0
	669	6,73	6,30	3.978,5	4.159,3	7.707,0	7.458,0
	699	6,47	5,99	5.967,7	6.148,6	7.006,0	6.780,0
	729	6,00	6,00	6.510,2	6.691,1	6.441,0	6.215,0
	759	5,91	6,07	5.967,7	5.606,0	7.032,0	6.554,0
	789	5,78	5,80	5.967,7	5.967,7	7.006,0	6.893,0
	809	5,70	5,73	6.148,6	6.148,6	6.893,0	6.554,0

Tabela 10: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 1 e 2.

Tempo de retenção	Dia	Biodigestor 1		Biodigestor 2	
		g DQO removida	% remoção	g DQO removida	% remoção
1º	0º	-	-	-	-
	3º	12,1	74,7	11,3	70,0
	6º	16,1	100,0	14,0	86,9
	9º	16,1	100,0	16,1	100,0
	12º	13,2	81,7	7,0	43,6
	15º	12,8	79,5	4,7	29,2
	18º	12,4	77,1	16,1	100,0
	20º	10,8	100,0	10,8	100,0
2º	23º	16,1	100,0	16,1	100,0
	26º	12,2	75,8	16,1	100,0
	29º	16,1	100,0	16,1	100,0
	32º	6,1	38,0	9,0	55,8
	35º	15,0	90,7	16,1	100,0
	38º	13,3	82,5	6,4	39,9
	40º	10,8	91,3	10,8	100,0
3º	43º	16,1	100,0	16,1	100,0
	46º	16,1	100,0	16,1	100,0
	49º	15,8	97,5	14,4	89,5
	52º	15,6	96,9	13,8	85,7
	55º	15,0	92,7	16,1	100,0
	58º	16,1	100,0	16,1	100,0
	60º	10,5	94,8	10,8	100,0
4º	63º	14,4	89,3	10,6	65,8
	66º	10,6	65,5	9,3	57,8
	69º	10,9	67,6	10,0	62,1
	72º	6,1	37,9	8,4	52,2
	75º	4,1	25,4	3,8	23,6
	78º	4,4	27,3	9,7	60,2
	80º	5,3	32,9	6,9	43,0

Tabela 11: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 3 e 4.

Tempo de retenção	Dia	Biodigestor 3		Biodigestor 4	
		g DQO removida	% remoção	g DQO removida	% remoção
	0º	-	-	-	-
1º	3º	15,6	96,9	16,1	100,0
	6º	16,1	100,0	16,1	100,0
	9º	16,1	100,0	16,1	100,0
	12º	9,1	56,5	9,2	57,1
	15º	5,8	36,0	10,7	66,5
	18º	16,1	100,0	8,7	54,0
	20º	10,6	65,8	10,6	100,0
	2º	23º	16,1	100,0	16,1
26º		14,2	88,2	16,1	100,0
29º		16,1	100,0	16,1	100,0
32º		9,0	55,9	12,4	77,0
35º		12,2	75,8	12,7	78,9
38º		10,3	64,0	12,2	75,8
40º		10,6	100,0	10,6	100,0
3º		43º	16,1	100,0	14,5
	46º	13,9	86,3	15,5	96,3
	49º	16,1	100,0	16,1	100,0
	52º	14,5	90,1	16,1	100,0
	55º	16,1	100,0	15,9	98,8
	58º	16,1	100,0	15,9	98,8
	60º	10,6	100,0	10,6	100,0
	4º	63º	11,4	70,8	11,8
66º		12,0	74,5	13,4	83,2
69º		10,9	67,7	12,0	74,5
72º		10,8	67,1	12,6	78,3
75º		11,6	72,1	11,7	72,7
78º		9,4	58,4	10,9	67,7
80º		8,2	50,9	8,6	60,3

Tabela 12: Remoção de DQO obtida na digestão anaeróbica do soro de queijo utilizando uma carga diária de 5,38 g DQO nos biodigestores 5 e 6.

Tempo de retenção	Dia	Biodigestor 5		Biodigestor 6	
		g DQO removida	% remoção	g DQO removida	% remoção
1º	0º	-	-	-	-
	3º	15,0	93,2	16,1	100,0
	6º	16,1	100,0	15,3	95,0
	9º	16,1	100,0	15,8	98,1
	12º	9,1	56,6	15,3	95,0
	15º	9,5	59,0	10,6	65,8
	18º	10,5	65,2	5,0	31,1
	20º	10,8	100,0	10,8	100,0
	2º	23º	16,1	100,0	16,1
26º		16,1	100,0	16,1	100,0
29º		16,1	100,0	10,5	65,2
32º		10,5	65,2	16,1	100,0
35º		10,8	67,1	14,4	89,4
38º		12,2	75,8	12,0	74,5
40º		10,8	100,0	10,8	100,0
3º		43º	11,3	70,2	15,9
	46º	13,2	82,0	15,7	97,5
	49º	16,1	100,0	16,1	100,0
	52º	16,1	100,0	16,1	100,0
	55º	16,1	100,0	15,8	95,0
	58º	15,8	98,1	14,7	91,3
	60º	10,8	100,0	10,0	92,6
4º	63º	12,4	77,0	13,4	83,2
	66º	11,9	73,9	13,6	84,5
	69º	12,8	79,5	12,9	80,1
	72º	10,5	65,2	13,3	82,6
	75º	9,9	61,5	10,6	65,8
	78º	8,7	54,0	9,1	56,5
	80º	9,1	56,5	10,2	63,3

Tabela 13: Produção de biogás (l) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.

Dia	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
1º	-	-	-	-	-	-
2º	1,78	1,32	1,75	1,85	1,87	1,73
3º	1,98	1,66	2,36	2,24	2,23	1,97
4º	1,81	1,65	2,23	2,09	2,21	1,97
5º	1,96	1,64	2,48	2,50	2,51	2,02
6º	2,12	1,64	2,18	2,22	2,35	2,13
7º	2,07	1,62	2,55	2,56	2,65	2,31
8º	2,15	1,64	2,73	2,89	2,58	2,11
9º	2,38	1,90	2,83	2,86	2,43	2,30
10º	2,42	2,20	2,72	2,80	2,36	2,13
11º	2,25	1,86	2,74	2,79	2,36	2,06
12º	2,40	1,92	2,68	2,70	2,40	2,27
13º	2,20	1,85	2,64	2,69	2,40	2,23
14º	2,15	1,92	2,55	2,57	2,53	2,10
15º	2,11	1,90	2,63	2,69	2,66	2,25
16º	2,15	1,95	3,11	2,89	2,64	2,30
17º	1,91	1,89	2,69	2,72	2,59	2,42
18º	2,37	2,19	2,78	2,70	2,70	2,29
19º	2,28	2,09	2,64	2,78	2,59	2,33
20º	2,14	1,97	2,39	2,52	2,56	2,13
Total	40,64	34,81	48,68	49,06	46,62	41,05

Tabela 14: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.

Dia	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
21º	2,20	2,01	2,40	2,63	2,59	2,49
22º	2,29	1,94	2,33	2,46	2,43	2,17
23º	2,28	2,06	2,46	2,56	2,44	2,43
24º	2,25	2,03	2,51	2,45	2,34	2,30
25º	2,23	2,01	2,51	2,50	2,38	2,23
26º	2,38	2,15	2,59	2,58	2,54	2,32
27º	2,23	2,07	2,48	2,41	2,40	2,27
28º	2,20	2,02	2,59	2,73	2,40	2,33
29º	2,23	2,03	2,45	2,57	2,31	2,30
30º	2,15	1,93	2,58	2,68	2,39	2,17
31º	1,90	1,78	2,23	2,41	2,30	1,94
32º	2,10	1,95	2,48	2,73	2,70	2,30
33º	1,99	1,79	2,27	2,54	2,46	1,98
34º	2,05	1,85	2,34	2,50	2,48	2,10
35º	2,10	1,93	2,47	2,48	2,58	2,20
36º	1,82	1,63	2,09	2,17	2,33	2,15
37º	1,89	1,76	2,11	2,08	2,36	2,13
38º	1,85	1,58	2,19	2,02	2,28	2,13
39º	1,80	1,56	2,30	1,98	2,38	2,10
40º	1,81	1,60	2,16	1,80	2,46	1,94
Total	41,75	37,68	47,54	45,72	48,55	43,98

Tabela 15: Produção de biogás (l) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.

Dia	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
41º	1,70	1,35	2,11	1,53	2,08	1,97
42º	1,68	1,38	2,19	1,69	2,10	2,00
43º	1,62	1,34	2,11	1,80	2,14	1,98
44º	1,54	1,40	1,94	1,84	2,17	2,00
45º	1,39	1,31	1,92	1,88	2,05	1,83
46º	1,20	1,27	1,91	2,00	2,11	2,02
47º	1,11	1,21	1,87	1,85	2,12	2,00
48º	1,14	1,34	1,98	1,95	2,11	2,00
49º	1,00	1,31	1,92	2,02	2,12	1,97
50º	0,95	1,21	1,87	1,99	2,03	1,81
51º	1,14	1,33	1,90	2,11	2,11	1,87
52º	1,20	1,48	1,98	2,15	2,24	1,94
53º	1,07	1,43	1,94	2,11	2,18	1,79
54º	1,11	1,46	1,95	2,10	2,20	1,82
55º	1,09	1,40	2,00	2,01	2,15	1,90
56º	1,15	1,42	2,01	1,96	2,18	1,95
57º	1,13	1,29	1,97	2,04	2,21	2,00
58º	1,10	1,20	1,93	2,10	2,20	2,01
59º	1,05	1,23	1,89	2,15	2,11	1,95
60º	1,00	1,20	1,90	2,10	2,13	1,99
Total	24,37	26,56	39,29	39,38	42,74	38,80

Tabela 16: Produção de biogás (1) nos biodigestores 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mantidos à temperatura de 35°C e alimentados com 5,38 g DQO/dia no primeiro tempo de retenção.

Dia	Biodigestor 1	Biodigestor 2	Biodigestor 3	Biodigestor 4	Biodigestor 5	Biodigestor 6
61º	0,99	0,93	1,61	1,91	1,74	1,12
62º	1,70	1,85	2,11	2,39	2,11	2,11
63º	1,57	1,87	2,23	2,46	2,23	2,22
64º	1,67	1,84	2,24	2,54	2,32	2,23
65º	1,68	1,83	2,26	2,46	2,26	2,13
66º	1,03	0,91	2,20	2,40	2,24	2,24
67º	0,64	1,24	2,05	2,49	2,06	2,09
68º	0,92	1,35	2,06	2,44	2,02	1,96
69º	0,79	1,05	1,98	2,37	1,89	1,99
70º	0,51	0,83	1,67	2,26	1,82	1,74
71º	0,62	0,89	2,10	2,15	1,98	1,93
72º	0,60	0,83	2,00	2,20	1,99	1,95
73º	0,54	0,32	1,23	1,76	1,41	1,61
74º	0,70	0,52	1,25	1,71	1,53	1,58
75º	0,73	0,31	1,03	1,70	1,63	1,72
76º	0,62	0,16	0,63	1,56	1,46	1,70
77º	0,66	0,10	1,01	1,46	1,30	1,59
78º	0,51	-	1,10	1,40	1,42	1,58
79º	0,42	0,09	0,98	1,20	1,32	1,41
80º	0,48	0,12	0,86	1,10	1,28	1,40
Total	17,38	17,04	32,60	39,96	26,01	36,30

Tabela 17: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo sem correção de pH à 35°C (Biodigestores 1 e 2)

Tempo de retenção (dia)	Carga adicionada aos biodig. (g DQO)	Produção de biogás (l)		Remoção de DQO (%)		l biogás produzido / g DQO removida		Valor de CH ₄ no biogás (l)		Valor teórico de CH ₄ em rel. à remoção DQO		Eficiência (%)	
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2
1º (19-20º)	107,6	40,6	34,8	87,6	75,7	0,43	0,43	13,4	10,3	33,0	28,5	40,6	36,2
2º (21º-40º)	107,6	41,8	37,7	82,6	85,1	0,47	0,41	13,5	10,9	31,1	32,0	43,4	25,1
3º (41º-60º)	107,6	24,4	26,6	97,4	96,6	0,23	0,26	7,1	8,0	36,5	36,2	19,6	22,1
4º (61º-80º)	107,6	17,4	17,0	49,4	52,1	0,33	0,30	3,1	3,8	18,5	19,6	16,8	22,6
					$\bar{x} \pm s$	0,37 \pm 0,10	0,35 \pm 0,07						

Tabela 18: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo com correção de pH à 5,5 e mantidos à 35°C (Biodigestores 3 e 4).

Tempo de retenção (dia)	Carga adicionada aos biodig. (g DQO)	Produção de biogás (l)		Remoção de DQO (%)		l biogás produzido / g DQO removida		Valor de CH ₄ no biogás (l)		Valor teórico de CH ₄ em rel. à remoção DQO		Eficiência (%)	
		Biod. 3	Biod. 4	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 3	Biod. 4	Biod. 3	Biod. 4
1ª (19-209)	107,6	48,7	49,1	79,3	82,5	0,57	0,55	15,8	17,3	29,7	31,3	53,2	55,3
2ª (219-409)	107,6	47,5	45,7	83,4	90,2	0,53	0,47	15,3	16,4	31,3	33,9	48,9	33,5
3ª (419-609)	107,6	39,3	39,4	96,6	97,7	0,38	0,38	13,9	11,8	36,5	36,9	38,1	31,0
4ª (619-809)	107,6	32,6	40,0	65,9	74,0	0,46	0,50	7,8	9,2	24,9	27,9	31,3	29,4
						$\bar{x} \pm s$	0,49±0,07	0,48±0,06					

Tabela 17: Eficiência da digestão anaeróbica de soro de queijo sem correção de pH à 35°C (Biodigestores 1 e 2)

Tempo de retenção (dia)	Carga adicionada aos biodig. (g DQO)	Produção de biogás (l)		Remoção de DQO (%)		l biogás produzido / g DQO removida		Valor de CH ₄ no biogás (l)		Valor teórico de CH ₄ em rel. à remoção DQO		Eficiência (%)	
		Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2	Biod. 1	Biod. 2
19 (19-209)	107,6	40,6	34,8	87,6	75,7	0,43	0,43	13,4	10,3	33,0	28,5	40,6	36,2
29 (219-409)	107,6	41,8	37,7	82,6	85,1	0,47	0,41	13,5	10,9	31,1	32,0	43,4	25,1
39 (419-609)	107,6	24,4	26,6	97,4	96,6	0,23	0,26	7,1	8,0	36,5	36,2	19,6	22,1
49 (619-809)	107,6	17,4	17,0	49,4	52,1	0,33	0,30	3,1	3,8	18,5	19,6	16,8	22,6
					$\bar{x} \pm s$	$0,37 \pm 0,10$	$0,35 \pm 0,07$						

Tabela 20: Remoção total de DQO em cada TR mantidos à 35°C e utilizando 5,38 g DQO/
/dia.

Digestores	1ªTR	2ªTR	3ªTR	4ªTR	$\bar{x} \pm s$
1	87,6	82,6	97,4	49,4	79,3±18,0
2	75,7	85,1	96,6	52,1	77,4±16,4
3	79,3	83,4	96,6	65,9	81,3±11,4
4	82,5	90,2	97,7	74,0	86,1± 8,8
5	82,0	86,9	92,5	66,8	82,1± 9,6
6	83,6	89,9	96,4	73,7	85,9± 8,4