

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE LAGOAS DE  
ESTABILIZAÇÃO PARA TRATAMENTO DE DEJETOS SUÍNOS**

**TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA  
A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**WALDIR MEDRI**

**ORIENTADORA: REJANE HELENA RIBEIRO DA COSTA**



**FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 1997  
SANTA CATARINA - BRASIL**

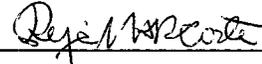
**MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS DE LAGOAS DE  
ESTABILIZAÇÃO PARA TRATAMENTO DE DEJETOS SUÍNOS**

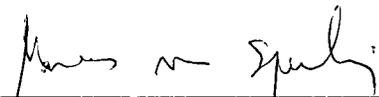
**WALDIR MEDRI**

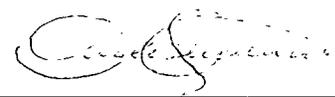
**Esta Tese foi julgada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA  
DE PRODUÇÃO e aprovada em sua forma final pelo programa de Pós-Graduação**

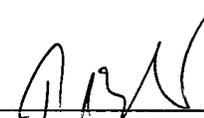
  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D.**  
**Coordenador do Curso**

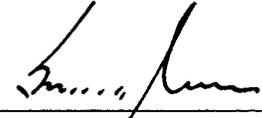
**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Rejane H. Ribeiro da Costa, Dra.**  
**Orientadora**

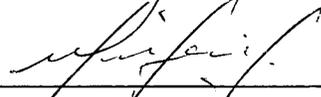
  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Marcos von Sperling, Ph.D.**  
**Examinador Externo**

  
\_\_\_\_\_  
**Carlos Cláudio Perdomo, Dr.**  
**Examinador Externo**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Paulo Belli Filho, Dr.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Edvaldo Alves de Santana, Dr.**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Maurício Luiz Sens, Dr.**  
**Moderador**

A meus pais, Leomar e Alzira.

A meus irmãos, Elza, Waldecir e Miriam.

A minha esposa, Fátima.

A meus filhos, Walkíria e William.

Dedico com muito amor.

## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Profa. Dra. Rejane Helena Ribeiro da Costa, pela dedicação e incentivo na execução deste trabalho, amizade e confiança a mim depositados.

À Banca Examinadora: Marcos von Sperling, Carlos Cláudio Perdomo, Paulo Belli Filho, Sérgio Fernando Mayerle, Edvaldo Alves de Santana e Maurício Luiz Sens, pelas críticas e sugestões ao trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, por oferecer uma oportunidade valiosa de atualização.

À Universidade Estadual de Londrina (UEL), minha Instituição de Trabalho, por sua política de valorização de seu corpo docente.

Ao Departamento de Matemática Aplicada da UEL pela liberação para a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Ao Centro Nacional de Pesquisas de Suínos e Aves (CNPISA) da Empresa Brasileira Agropecuárias (EMBRAPA), localizado em Concórdia/SC., que construiu o Sistema Experimental de Tratamento de Dejetos Suínos, permitindo a aplicação desta metodologia, liberando funcionários e as dependências laboratoriais.

Ao colega e Professor Amarildo de Vicente pelo auxílio no programa computacional.

À minha família pela paciência, estímulo e dedicação.

E a Deus, por ter me acompanhado e auxiliado para a realização deste trabalho.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....        | 01 |
| 1.1. Considerações gerais.....    | 01 |
| 1.2. O problema.....              | 05 |
| 1.3. Importância do trabalho..... | 06 |
| 1.4. Objetivos.....               | 10 |
| 1.5. Hipóteses.....               | 11 |
| 1.6. Limitações do trabalho.....  | 11 |
| 1.7. Linha de pesquisa.....       | 12 |
| 1.8. Estrutura do trabalho.....   | 12 |

### CAPÍTULO 2

|  |    |
|--|----|
| <b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....  | 14 |
| 2.1. Introdução.....   | 14 |
| 2.2. Produção de dejetos de suínos.....  | 15 |
| 2.3. Consumo de água por suíno.....  | 17 |
| 2.4. Principais indicadores de poluentes.....  | 19 |
| 2.5. Classificação das lagoas de estabilização.....  | 20 |
| 2.5.1. Lagoas anaeróbias.....  | 21 |
| 2.5.2. Lagoas facultativas.....  | 23 |
| 2.5.3. Lagoas de maturação ou aeróbias.....  | 24 |
| 2.6. Carga orgânica utilizada nas lagoas.....  | 25 |
| 2.7. Volume de lagoa por suíno.....  | 27 |
| 2.8. Fatores que influenciam o desempenho das lagoas de estabilização<br>na remoção de matéria orgânica..... | 29 |
| 2.9. Fatores que influenciam a remoção de nutrientes.....  | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 2.10. Fatores que influenciam o desempenho das lagoas de estabilização<br>na remoção de coliformes fecais..... | 33 |
| 2.11. Critérios e modelos de dimensionamento das lagoas.....   | 35 |
| 2.11.1. Modelos de remoção da matéria orgânica para projetos de lagoas.....                                    | 36 |
| 2.11.2. Modelos de remoção de nitrogênio para projetos de lagoas.....  | 48 |
| 2.11.3. Modelos de remoção de microorganismos patogênicos para<br>projetos de lagoas... ..                     | 50 |
| 2.12. Lagoas de estabilização em série.....  | 53 |
| 2.13. Conclusão do capítulo.....   | 54 |

### **CAPÍTULO 3**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>  | <b>55</b> |
| 3.1. Considerações iniciais.....   | 55        |
| 3.2. Unidade experimental de tratamento de dejetos suínos - UNETDS.....                  | 56        |
| 3.2.1. Descrição do sistema experimental - CNPSA/EMBRAPA.....                            | 56        |
| 3.2.2. Alimentação do sistema e carga das lagoas.....                                    | 59        |
| 3.2.3. Monitoramento de rotina.....  | 63        |
| 3.2.4. Local de coleta e análises físico-químicas.....                                   | 63        |
| 3.3. Descrição do sistema de tratamento de dejetos suínos<br>COOPERCENTRAL - AURORA..... | 67        |
| 3.3.1. Alimentação do sistema e carga das lagoas.....                                    | 69        |
| 3.3.2. Monitoramento de rotina.....  | 69        |

### **CAPÍTULO 4**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES.....</b>                     | <b>71</b> |
| 4.1. Apresentação dos resultados experimentais.....                      | 71        |
| 4.2. Sistema de tratamento de dejetos suínos UNETDS - CNPSA/EMBRAPA..... | 71        |
| 4.2.1. Demanda bioquímica de oxigênio (DBO <sub>5</sub> ).....           | 74        |
| 4.2.2. Demanda química de oxigênio (DQO).....                            | 77        |
| 4.2.3. Sólidos.....  | 84        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2.4. Nitrogênio total.....  | 85  |
| 4.2.5. Fósforo total.....   | 89  |
| 4.2.6. Variações sazonais na lagoa de aguapés.....  | 92  |
| 4.2.7. Coliformes fecais.....   | 96  |
| 4.2.8. pH.....  | 99  |
| 4.2.9. Temperatura.....   | 101 |
| 4.2.10. Dados climatológicos.....   | 103 |
| 4.2.11. Regime de fluxo hidráulico das lagoas.....  | 105 |
| 4.3. Sistema de lagoas da Cooperativa Central Oeste Catarinense.....  | 108 |
| 4.4. Conclusão do capítulo - Parâmetros fundamentais para dimensionamento<br>de lagoas de dejetos suínos..... | 110 |

## **CAPÍTULO 5**

### **5. ESTRUTURA DE CUSTOS DO SISTEMA DE LAGOAS DE**

|   |            |
|---|------------|
| <b>ESTABILIZAÇÃO.....</b>   | <b>114</b> |
| 5.1. Introdução.....  | 114        |
| 5.2. Estrutura de custos do sistema de lagoas.....                  | 115        |
| 5.3. Modelo matemático.....   | 117        |
| 5.3.1. Custo da área de terra ocupada pelo sistema de lagoas.....   | 117        |
| 5.3.2. Custo de construção das lagoas de estabilização.....         | 117        |
| 5.3.3. Custo de operação do sistema de lagoas de estabilização..... | 119        |
| 5.4. Otimização do sistema - avaliação de um parâmetro.....         | 121        |
| 5.4.1. Modelo matemático de eficiência de cada lagoa.....           | 122        |
| 5.4.2. Tempo de detenção da lagoa i.....                            | 123        |
| 5.4.3. Modelo matemático da estrutura de custos.....                | 124        |
| 5.4.3.1. Custo da terra.....  | 124        |
| 5.4.3.2. Custo de construção.....                                   | 125        |
| 5.4.3.3. Custo de operação.....                                     | 127        |
| 5.4.4. Função objetivo.....   | 129        |

|  |     |
|--|-----|
| 5.5. Otimização do sistema - avaliação de dois parâmetros.....       | 130 |
| 5.5.1. Modelo matemático de eficiência de cada lagoa.....            | 130 |
| 5.5.2. Tempo de detenção da lagoa i.....                             | 131 |
| 5.5.3. Função objetivo.....  | 134 |
| 5.6. Modelo matemático de custos após a obtenção das constantes..... | 137 |
| 5.6.1. Modelo de escavação mecânica da terra.....                    | 137 |
| 5.6.2. Modelo de revestimento das lagoas.....                        | 138 |
| 5.6.3. Modelo de manutenção das lagoas.....                          | 139 |
| 5.6.4. Modelo de movimento da terra.....                             | 140 |
| 5.7. Análise econômica.....  | 141 |
| 5.8. Custo unitário por suíno.....                                   | 142 |

## **CAPÍTULO 6**

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>6. APLICAÇÕES.....</b> | <b>143</b> |
|---------------------------|------------|

## **CAPÍTULO 7**

|   |            |
|---|------------|
| <b>7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b> | <b>158</b> |
|---|------------|

|  |            |
|--|------------|
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>165</b> |
|--|------------|

## **ANEXOS**

|                |     |
|----------------|-----|
| ANEXO I.....   | 183 |
| ANEXO II.....  | 188 |
| ANEXO III..... | 191 |
| ANEXO IV.....  | 196 |
| ANEXO V.....   | 200 |
| ANEXO VI.....  | 203 |
| ANEXO VII..... | 205 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Produção média diária de dejetos nas diferentes fases dos suínos.....  | 17 |
| Tabela 2.2 - DBO <sub>5</sub> per capita nas diferentes fases dos suínos.....   | 17 |
| Tabela 2.3 - Exigência de água dos suínos, de acordo com a fase do ciclo de produção.....   | 18 |
| Tabela 2.4 - Volume mínimo recomendado para lagoas anaeróbias para vários tipos de animais domésticos e respectivos pesos.....  | 28 |
| Tabela 2.5 - Volume mínimo recomendado para lagoas anaeróbias contendo dejetos de suínos na Carolina do Norte (EUA).....  | 28 |
| Tabela 2.6 - Área mínima recomendada para manter naturalmente as condições aeróbicas.....   | 29 |
| Tabela 3.1 - Características físicas das lagoas do sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA.....                        | 59 |
| Tabela 3.2 - Características operacionais das lagoas do sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA.....                   | 62 |
| Tabela 3.3 - Programação de amostragem do decantador e das lagoas da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997..... | 63 |
| Tabela 3.4 - Características físicas das lagoas de estabilização do sistema de tratamento da COOPERCENTRAL/AURORA.....  | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 3.5 - Características operacionais das lagoas do sistema de tratamento da COOPERCENTRAL - AURORA.....   | 69 |
| Tabela 4.1 - Resultados do sistema experimental CNPSA/EMBRAPA, baseados no monitoramento de rotina de amostras, referentes aos afluentes do decantador e de cada lagoa nos seus respectivos períodos de operação (tempo de detenção total =125 dias).....  | 72 |
| Tabela 4.2 - Resultados do sistema experimental CNPSA/EMBRAPA, baseados no monitoramento de rotina de amostras, referentes aos efluentes do decantador e de cada lagoa nos seus respectivos períodos de operação (tempo de de tenção total =125 dias)..... | 73 |
| Tabela 4.3 - Cargas da DBO <sub>5</sub> superficial e volumétrica (aplicada e removida) para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, nos períodos de janeiro (LA1), fevereiro (LA2), março (LF) e outubro (LAG) de 1996 a agosto de 1997.....                | 77 |
| Tabela 4.4 - Cargas da DQO superficial e volumétrica (aplicada e removida) para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, nos períodos de janeiro (LA1), fevereiro (LA2), março (LF) e outubro (LAG) de 1996 a agosto de 1997.....                             | 79 |
| Tabela 4.5 - Valores médios obtidos com a lagoa de aguapés no período de outubro/96 a fevereiro de 1997 no CNPSA.....  | 92 |
| Tabela 4.6 - Valores médios obtidos com a lagoa de aguapés no período de maio a agosto de 1997 no CNPSA.....   | 92 |
| Tabela 4.7 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés em duas épocas climáticas distintas.....   | 93 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.8 - Valores médios e variações mínimas e máximas obtidos de Coliformes Fecais no afluente e efluente das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA.....        | 96  |
| Tabela 4.9 - Cargas superficial e volumétrica (aplicadas e removidas) de Coliformes Fecais para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, no período de maio/96 a agosto/97.....                        | 99  |
| Tabela 4.10 - Valores médios e variações mínimas e máximas, obtidos para o pH no afluente e efluente do decantador e das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA..... | 100 |
| Tabela 4.11 - Valores médios e variações mínimas e máximas, obtidos para a temperatura nas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA.....                                      | 101 |
| Tabela 4.12 - Dados climatológicos obtidos na Estação Agrometeorológica da EMBRAPA do Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves - CNPSA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.....     | 103 |
| Tabela 4.13- Resultados do sistema da COOPERCENTRAL/AURORA, baseados no monitoramento, entre fevereiro e novembro de 1996 (tempo de detenção total = 86,6 dias). ....                               | 109 |
| Tabela I.1 - Valores médios obtidos para o decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro de 1996.....   | 183 |
| Tabela I.2 - Valores médios obtidos para a lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro de 1996.....   | 184 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela I.3 - Valores médios obtidos para a lagoa LA2 no CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro a outubro de 1996.....   | 185 |
| Tabela I.4 - Valores médios obtidos para a lagoa LF no CNPSA/EMBRAPA, no período de março a outubro de 1996.....  | 186 |
| Tabela I.5 - Valores médios obtidos para a lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro de 1996 a fevereiro de 1997.....                                   | 187 |
| Tabela II.1 - Valores médios obtidos para o decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de janeiro de 1996 a agosto de 1997.....                | 188 |
| Tabela II.2 - Valores médios obtidos para a lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de janeiro de 1996 a agosto de 1997.....                    | 188 |
| Tabela II.3 - Valores médios obtidos para a lagoa LA2 no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de fevereiro de 1996 a agosto de 1997.....                  | 189 |
| Tabela II.4 - Valores médios obtidos para a lagoa LF no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de março de 1996 a agosto de 1997.....                       | 189 |
| Tabela II.5 - Valores médios obtidos para a lagoa LAG no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de outubro de 1996 a agosto de 1997.....                    | 190 |
| Tabela III. 1 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente do decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.... | 191 |
| Tabela III. 2 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.....    | 192 |

- Tabela III. 3 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LA2  
no CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro 1996 a agosto 1997.....193
- Tabela III. 4 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LF  
no CNPSA/EMBRAPA, no período de março 1996 a agosto de 1997.....194
- Tabela III. 5 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LAG  
no CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro 1996 agosto de 1997.....195

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 6.1 - Características físicas das lagoas (4 lagoas) e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.....145
- Quadro 6.2 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.....146
- Quadro 6.3 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 99%.....146
- Quadro 6.4 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, porém sem considerar os custos para retirar os aguapés e admitindo-se vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.....147
- Quadro 6.5 - Características físicas das lagoas (5 lagoas) e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.....148
- Quadro 6.6 - Características físicas das lagoas (6 lagoas) e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.....149
- Quadro 6.7 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .....152

- Quadro 6.8 - Características físicas das lagoas (5 lagoas) e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .....154
- Quadro 6.9 - Características físicas das lagoas (6 lagoas) e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .....156
- Quadro IV.1 - Custos orçados de escavação mecânica e acerto de aludes, praticados pelo CIDASC - Centro Integrado de Desenvolvimento Agropecuário de Santa Catarina.....196
- Quadro IV.2 - Custos orçados para vinimanta de PVC flexível plana de espessura 0,5 mm para revestimento das lagoas praticados pela IRRIGATER - Irrigação e Meio Ambiente (R\$ 4,50/m<sup>2</sup>).....197
- Quadro IV.3 - Custos orçados de manutenção, conservação e limpeza de áreas de circulação das lagoas de estabilização, praticados pela Empresa TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.....198
- Quadro IV.4 - Custos orçados de limpeza, de escavação mecânica e de compactação do solo das lagoas de estabilização, praticados pela Empresa TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.....199
- Quadro VI.1 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica e compactação e de manutenção do sistema, após a aplicação do modelo, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98% de DBO.....204

**LISTA DE FIGURAS**

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 - Porcentagem do rebanho suíno brasileiro nas diferentes regiões.....  | 03 |
| Figura 1.2 - Exemplos de algumas formas de disposição e/ou tratamento de dejetos suínos....   | 09 |
| Figura 2.1 - Efeito da temperatura na velocidade de redução dos sólidos voláteis às<br>temperaturas de 20, 30 e 50°C.....                               | 30 |
| Figura 2.2 - Eficiência de remoção da DBO.....  | 45 |
| Figura 3.1 - Sistema de tratamento de dejetos de suínos da Unidade Experimental<br>UNETDS do CNPSA/EMBRAPA.....   | 58 |
| Figura 3.2 - Vista da lagoa anaeróbia LA1 do sistema experimental do CNPSA.....   | 60 |
| Figura 3.3 - Vista da lagoa anaeróbia LA2 do sistema experimental do CNPSA.....   | 60 |
| Figura 3.4 - Vista da lagoa facultativa LF do sistema experimental do CNPSA.....  | 61 |
| Figura 3.5 - Vista da lagoa de aguapés LAG do sistema experimental do CNPSA.....  | 61 |
| Figura 3.6 - Diagrama do fluxo hidráulico e pontos de coleta das lagoas do sistema de<br>tratamento da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA..... | 65 |
| Figura 3.7 - Esquema do sistema de tratamento de dejetos suínos da Cooperativa Central<br>do Oeste de Santa Catarina - COOPERCENTRAL - AURORA.....      | 68 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.1 - Eficiência de remoção da DBO no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA..... | 75 |
| Figura 4.2 - Eficiência de remoção da DQO no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA..... | 78 |
| Figura 4.3 - Concentrações médias mensais da DQO do (o) afluente e do (□) efluente da lagoa anaeróbia LA1 do CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro/96 a agosto/97.....                     | 80 |
| Figura 4.4 - Concentrações médias mensais da DQO do (o) afluente e do (□) efluente da lagoa anaeróbia LA2 do CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro/96 a agosto/97.....                   | 81 |
| Figura 4.5 - Concentrações médias mensais da DQO do (o) afluente e do (□) efluente da lagoa facultativa LF do CNPSA/EMBRAPA, no período de março/96 a agosto/97.....                      | 82 |
| Figura 4.6 - Concentrações médias mensais da DQO do (o) afluente e do (□) efluente da lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro/96 a agosto/97.....                    | 83 |
| Figura 4.7 - Eficiência de remoção do ST, SF e SV nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.....           | 84 |

- Figura 4.8 - Eficiência de remoção do Nitrogênio total no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.....86
- Figura 4.9 - Eficiência de remoção do Fósforo total no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.....90
- Figura 4.10 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés do CNPSA na época primavera/verão.....94
- Figura 4.11 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés do CNPSA na época outono/inverno.....94
- Figura 4.12 - Concentrações do afluente e do efluente de Coliformes Fecais das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG, no período de operação de maio/96 a agosto/97 no CNPSA/EMBRAPA.....97
- Figura 4.13 - Variações mensais médias do pH: (●) dejetos brutos e (□) lagoa anaeróbia LA1 no período de janeiro/96 a agosto/97, (Δ) lagoa anaeróbia LA2 no período de fevereiro/96 a agosto/97, (x) lagoa facultativa LF no período de março/96 a agosto/97 e (o) lagoa de aguapés LAG no período de outubro/96 a agosto/97.....100
- Figura 4.14 - Variações mensais médias da temperatura: (o) do ambiente e (●) da lagoa anaeróbia LA1 no período de janeiro/96 a agosto/97, (□) da lagoa anaeróbia LA2 no período fevereiro/96 a agosto/97, (Δ) da lagoa facultativa LF no período de março/96 a agosto/97 e (x) da lagoa de aguapés LAG no período de outubro/96 a agosto/97.....102

- Figura 4.15 - Variações mensais médias das temperaturas ambientes: (●) máximas (□) médias e (Δ) mínimas, registradas no período de janeiro/96 a agosto/97, na Estação Agrometeorológica do CNPSA/EMBRAPA.....104
- Figura 4.16 - Evolução dos parâmetros: (●) DBO, (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa anaeróbia LA1 do CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro/96..106
- Figura 4.17 - Evolução dos parâmetros: (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa anaeróbia LA2 do CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro a outubro/96.....106
- Figura 4.18 - Evolução dos parâmetros: (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa facultativa LF do CNPSA/EMBRAPA, no período de março a outubro/96.....107
- Figura 4.19 - Evolução dos parâmetros: (●) DBO, (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro/96 a fevereiro/97.....107
- Figura. 4.20 - Eficiência de remoção da DBO<sub>5</sub> e do NT simples e acumulada, no decantador DP e nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, e na lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA.....112
- Figura 5.1 - Esquema de fluxo de recursos de desembolso e pagamento do pessoal de manutenção.....120
- Figura 5.2 - Representação de um sistema de lagoas de estabilização.....121
- Figura 5.3 - Eficiência de remoção dos parâmetros DBO e DQO em cada lagoa com o tempo de permanência.....122

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.4 - Custos (---) estimados e (□) orçados de escavação mecânica a acerto de taludes praticados pelo CIDASC - Centro Integrado de Desenvolvimento Agropecuário de Santa Catarina..... | 137 |
| Figura 5.5 - Custos (---) estimados e (□) orçados de revestimento das lagoas praticados pela IRRIGATER - Irrigação e Meio Ambiente.....  | 138 |
| Figura 5.6 - Custos (---) estimados e (□) orçados de manutenção e conservação do sistema de lagoas praticados pela TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.....  | 139 |
| Figura 5.7 - Custos (---) estimados e (□) orçados de escavação mecânica e compactação das lagoas praticados pela TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.....  | 140 |
| Figura V.1 - Eficiência da DBO da lagoa anaeróbia LA1 com o tempo de detenção.....   | 200 |
| Figura V.2 - Eficiência da DBO da lagoa anaeróbia LA2 com o tempo de detenção.....   | 200 |
| Figura V.3 - Eficiência da DBO da lagoa facultativa LF com o tempo de detenção.....  | 201 |
| Figura V.4 - Eficiência da DBO da lagoa de aguapés LAG com o tempo de detenção.....  | 201 |
| Figura V.5 - Eficiência do NT da lagoa facultativa LF com o tempo de detenção.....   | 202 |
| Figura V.6 - Eficiência do NT da lagoa de aguapés LAG com o tempo de detenção.....   | 202 |

## RESUMO

Os sistemas de tratamento de dejetos de suínos se revestem de grande importância sanitária, tendo em vista o intenso crescimento da atividade suinícola, principalmente na Região Oeste Catarinense, e a modernização dos sistemas de confinamento dos animais, face ao aumento crescente no uso de água para higienização das baias. Dessa forma, a criação de suínos em grande escala trouxe como consequência a intensa produção de dejetos nas propriedades rurais, os quais são altamente poluentes e causadores da degradação ambiental, como contaminação dos corpos receptores e desenvolvimento de odores.

Os elevados volumes de dejetos produzidos nas granjas, carregados com nitrogênio e fósforo, na maioria das situações, não são aplicáveis por apresentar áreas reduzidas e com limitações topográficas, dificultando o seu aproveitamento como fertilizante do solo. Assim, tanto os médios quanto os grandes produtores têm excedentes de resíduos orgânicos que precisam ser tratados eficientemente para eliminar, ou pelo menos, minimizar os problemas ambientais decorrentes da atividade suinícola.

Várias alternativas de tratamento têm sido propostas para tratar a fração líquida. As lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos são consideradas entre os métodos de tratamento de águas residuárias e industriais como sendo os mais fáceis, econômicos e eficientes. Suas vantagens em relação a outros tipos de tratamento têm sido destacadas, uma vez que apresentam um excelente desempenho quanto à eficácia na remoção de matéria orgânica, dos sólidos, dos nutrientes e de coliformes fecais; além dos baixos custos de implantação e manutenção. Contudo, a grande dificuldade é como dimensionar essas lagoas para tratamento desses resíduos, já que em nível de Brasil pouco se tem a respeito de parâmetros de projeto.

Este trabalho apresenta resultados obtidos de um sistema de tratamento composto por decantador de palhetas e quatro lagoas de estabilização, em escala real, dispostas em série:

duas anaeróbias seguidas de uma facultativa e uma de aguapés, em operação durante 20 (vinte) meses, tendo o objetivo de buscar parâmetros reais de funcionamento das lagoas para ajustamento de equações. Além disso, busca-se, também, a obtenção dos dados de custos de capital e operacional para “*a modelagem e a otimização de sistemas*”, aplicados no tratamento de resíduos orgânicos de suínos, dentro de concepções econômicas.

O sistema de tratamento foi monitorado através de amostras coletadas nos afluentes e efluentes do decantador e das lagoas e ao longo dos fluxos das mesmas; foram analisados os seguintes parâmetros: Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF), Sólidos Voláteis (SV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (PT), Coliformes Fecais (CF), pH e temperatura, de acordo com métodos estabelecidos pelo “Standard Methods” (APHA - AWWA - WEF, 1992).

Uma das principais vantagens de se utilizar o modelo “*otimização do sistema*” no tratamento de dejetos suínos está ligada, justamente, à redução da matéria orgânica (DBO) e de nitrogênio. Ou seja, o sistema pode ser operado de tal forma que regule as quantidades desses compostos que serão introduzidos nos corpos receptores, levando-se em consideração o capital disponível.

Os resultados obtidos com a otimização do sistema de lagoas permitem concluir que: quando se deseja apenas a remoção da matéria orgânica (DBO), o modelo determina que se construam as lagoas anaeróbias maiores do que as facultativas, e quando se desejar a remoção de ambos os parâmetros: DBO e Nitrogênio, em porcentagens iguais, o modelo determina a construção das lagoas facultativas maiores do que as anaeróbias.

No primeiro caso, para uma produção de 3.000 suínos, com remoção de 98% de DBO e taxa de fluxo de 30 m<sup>3</sup>/dia (admitindo-se 1 suíno = 10 litros/dias), e considerando-se uma taxa de juros de 15% ao ano durante 10 anos, o custo unitário é da ordem de R\$ 1,62 por suíno/ano. À medida que o número de suínos aumenta, o custo unitário decresce em função das economias de escala. No segundo caso, para uma remoção de aproximadamente 98% de ambos os parâmetros e mesma taxa de fluxo, o custo unitário é de R\$ 1,84 por suíno/ano.

## ABSTRACT

Systems for treating waste from hogs have taken on a great importance in terms of sanitation, in view of the growth in the intensity of hog raising, mainly in the western region of Santa Catarina, and the modernization of the systems for confining the animals, due to the increasing use of water for depolluting the bays. For this reason, large scale hog raising has resulted in an intense production of waste in rural areas. This waste matter is highly pollutant and has caused environmental degradation, with contamination of the area receiving it and the emission of noxious odors.

The high volume of waste produced on farms, containing large quantities of nitrogen and phosphorus is unfeasible for restricted areas with topographic limitations - a fact which makes it difficult to utilize it as a fertilizer for the soil. In this way, both medium and large-scale producers have an excess of organic residue that must be treated efficiently in order to eliminate, or at least minimize, the environmental problems stemming from the hog raising activity.

Various alternatives have been proposed for treating the liquid portion. Stabilization ponds for treating hog waste are considered the easiest, the most economical and the most efficient methods for treating residual and industrial waters. Their advantages over other kinds of treatment have been pointed out, since it has shown an excellent performance in terms of efficacy of removing organic material, solids, nutrients and fecal coliforms, in addition to the low cost for the installation and maintenance of the system. However, there seems to be a great difficulty in dimensioning these ponds for the treatment of residues, inasmuch as in Brazil parameters for such a project have not yet been well defined.

This study presents the results obtained from a system of treatment, composed of a slat decanter and four stabilization ponds, on a real scale, laid out in series: two anaerobic ones, followed by an facultative one and one with water lilies, in operation for 20 (twenty) months, with the aim of establishing the real parameters for the functioning of the ponds, in order to

adjust the equations. Furthermore, data are sought concerning capital and operating costs for the “*modeling and optimization of systems*”, applied to the treatment of organic and hog residues, in terms of economic conceptions.

The treatment system was monitored by means of samples collected from the affluents and effluents of the decanter and from water flowing in the ponds. The following parameters were analyzed: Total Solids (ST), Fixed Solids (SF), Volatile Solids (SV), Chemical Demand for Oxygen (DQO), Biochemical Demand for Oxygen (DBO), Total Nitrogen (NT), Total Phosphorus (PT), Fecal Coliforms (CF), pH and temperature, according to the methods established by the “Standard Methods” (ALPHA - AWWA - WEF, 1992).

One of the main advantages in the utilization of the model “*system optimization*” in the treatment of hog waste is closely linked to the reduction of organic material (DBO) and of nitrogen. This means that the system can be operated so as to regulate the quantities of these compounds to be introduced into the receiving bodies, taking into consideration the amount of capital available.

From the results obtained with the optimization of the system of ponds, it can be concluded that: when only the removal of organic material (DBO) is desired, the model determines the building of larger anaerobic ponds than facultative ones, and when the removal of both parameters is desired - DBO and Nitrogen - in equal proportion, the model determines the building of larger facultative ponds than anaerobic ones.

In the first case, for a production of 3,000 hogs, with a removal 98% of DBO and a flow rate of 30m<sup>3</sup>m per day (assuming 1 hog = 10 liters/days), and considering an interest rate of 15% a year during ten years, the unitary cost will be R\$ 1.62 per hog per year. As the number of hogs increases, the unitary cost decreases, due to the economy of scale. In the second case, for a removal of approximately 98% of both parameters and the same flow rate, the unitary cost is R\$ 1.84 per hog per year.

## CAPÍTULO 1

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1. Considerações gerais

A suinocultura em nível nacional ou estadual é uma das atividades mais importantes do complexo agropecuário brasileiro, por ser predominantemente desenvolvida em pequenas propriedades rurais e em áreas com limitações topográficas para o estabelecimento de lavouras extensivas. Além de gerar renda, alimento e emprego, a suinocultura constitui-se, portanto, num excelente instrumento de fixação do homem ao campo. Cerca de 81,7% de suínos são criados em unidades de até 100 hectares, (Oliveira et al, 1993), conforme levantamento feito pelo Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves (CNPISA). Essa atividade se encontra presente em 46,5% das 5,8 milhões de propriedades rurais existentes no País, empregando mão-de-obra tipicamente familiar e constituindo-se em grande fonte de renda e de estabelecimento social.

O rebanho mundial de suínos estimado em 1996 é de 785,5 milhões de animais, responsável pela produção anual de 78,5 milhões de toneladas de carne (World Agricultural Production, 1997). Em 1994, o rebanho mundial contava com 744,2 milhões de cabeças, com uma produção anual de 70,8 milhões toneladas de carne. Portanto, neste intervalo de período houve um aumento em torno de 5,55% de animais e 10,87% de carne. Ainda de acordo com os dados estimados pela World Agricultural Production (1997), a China, com um rebanho de 441,7 milhões de cabeças, continua sendo a maior produtora de carne suína, vindo a seguir os Estados Unidos, Alemanha e França. A produção brasileira de suínos cresceu sobretudo no Sul, principal região produtora do país. Com o crescimento de 20%, o volume produzido no Brasil de 1,3 milhão de toneladas no ano de 1994 (dados reais) passou para 1,56 milhão de toneladas no ano de 1996 (dados estimados). Então, neste intervalo, o Brasil passou de décimo segundo

para o nono produtor mundial de carne suína. Porém ocupa a terceira posição mundial em número de suínos, ou seja, 32,5 milhões de cabeças.

Esse crescimento se deve à redução do custo inflacionário sobre os preços e os salários e à incorporação de novos consumidores a partir do segundo semestre do ano de 1993, em razão da estabilização da moeda do plano econômico implantado no País. Além disso, existe potencialidade para expansão desse valor, o que dependeria do aumento da renda per capita ou de maiores exportações.

O consumo per capita no País está na faixa de 7,8 kg/hab/ano. Este número é baixo se comparado com a União Européia que consome, em média, 41,3 kg/hab/ano (Suinocultura Industrial, 1997). Portanto, o consumo per capita no Brasil poderia ser maior, pois, segundo Roppa (1997), a carne suína é um alimento nutritivo. Além disso, em recente pesquisa de opinião pública, 92% dos entrevistados destacam como positivos, a maciez e o sabor característico do produto. Ao mesmo tempo, os teores de gordura e colesterol, que nas pesquisas são apontados por 55% das pessoas como ponto fraco da carne suína, são um problema do passado. De 1980 até hoje, o suíno moderno perdeu 31% de seu nível de gordura, 14% de calorias e 10% do colesterol.

Sem dúvida, a suinocultura é uma atividade agropecuária relevante para a Região Sul, pois representa 33% do rebanho nacional segundo a Suinocultura Industrial (1997), como mostra a Figura 1.1, e Santa Catarina é a responsável por um rebanho estimado em torno de 3,8 milhões de animais, o que corresponde 11,7% do rebanho brasileiro. Entre 1994 e 1995, a carne suína deste Estado, conforme a Síntese Anual da Agricultura de Santa Catarina (1995), teve uma participação de 16,86% no Valor Bruto da Produção Agropecuária total (VBP), ocupando o segundo lugar em importância econômica, logo depois do frango (23,78%). Ainda segundo esta Síntese Anual da Agricultura, a concentração dos suínos encontra-se principalmente na Região Oeste, o que traduz um quadro crítico quanto à poluição dos dejetos provenientes das instalações suínícolas que, em sua maioria, funcionam sem unidades de tratamento e sem valorização de seus dejetos.

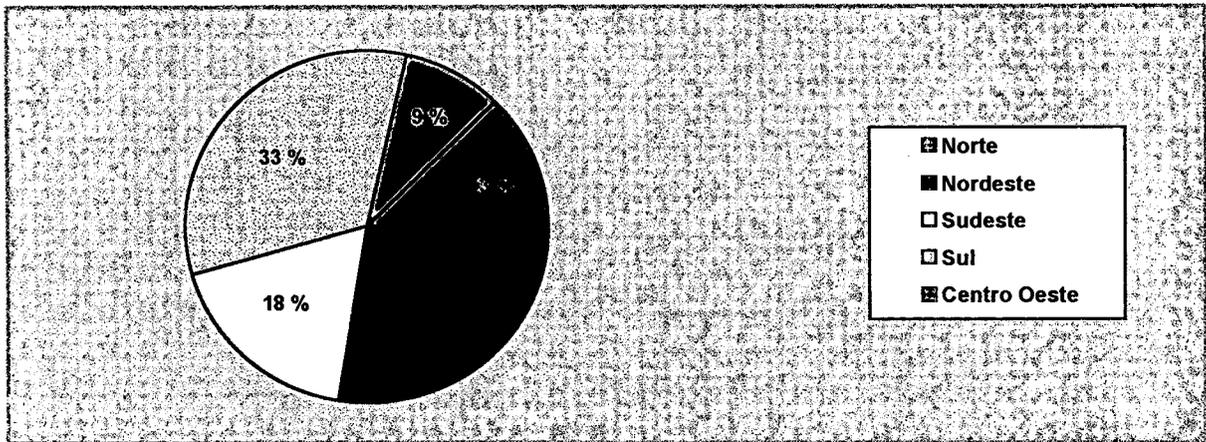


Fig. 1.1 - Porcentagem do rebanho suíno brasileiro nas diferentes regiões.

Neste sentido, a criação de suínos em grande escala industrial trouxe como consequência a intensa produção de dejetos nas propriedades rurais, os quais são altamente poluentes e causadores da degradação ambiental, como contaminação dos corpos receptores e desenvolvimento de odores, uma vez que, atualmente, apenas de 10 a 15 % dos produtores brasileiros possuem sistemas de tratamento ou de aproveitamento de dejetos (Oliveira et al, 1993; Sousa, 1995). Os elevados volumes de dejetos produzidos nas granjas, carregados com nitrogênio e fósforo, a reduzida área para a lavoura e o relevo acidentado excedem a capacidade disponível da terra ao redor dos grandes suinocultores, dificultando o seu aproveitamento como fertilizante do solo.

Um dos maiores problemas da suinocultura refere-se, portanto, aos resíduos orgânicos dos animais, que são agentes poluidores do meio ambiente, tendo um potencial poluidor em torno de 4,2 vezes a mais do que o esgoto doméstico, pois enquanto este apresenta uma DBO per capita de 45 g/hab/dia, conforme World Health Organization (1987), o Agricultural Sanitation and Waste Management Committee - ASAE (1993), estabelece uma DBO per capita de 189 g/suíno/dia, com peso de 61 kg. De acordo com Costa et al (1995a), os dejetos de suínos apresentam um poder poluente bem superior ao esgoto humano, sendo em alguns aspectos 50 vezes mais concentrados, como é o caso da DBO.

Vários pesquisadores estão empenhados na busca de alternativas para solucionar tal problema, que é de difícil equacionamento. Uma das soluções é o armazenamento dos dejetos através de esterqueiras e bioesterqueiras para posteriormente serem usados na lavoura como adubo, já que os dejetos suínos são ricos em nutrientes e devem ser aproveitados como fertilizante do solo (Gosmann, 1997). Oliveira et al (1993) recomendam aplicação de 160 kg NTK/ha/ano. Uma vez que o produtor não dispõe de área suficiente para absorver toda a carga orgânica, deve-se procurar outra solução, como a utilização de tratamentos preliminares, seguidos de tratamentos biológicos (lagoas de estabilização).

As lagoas de estabilização são uma forma popular de tratamento de águas residuárias, em virtude de seus baixos custos de capital e operacional (Ferrara et al, 1980; Polprasert e Bhattarai, 1985; Moreno et al, 1988), além de suas habilidades para absorver flutuações de cargas orgânicas e hidráulicas.

Apesar das restrições ambientais existentes, gerada pelos excrementos de suínos e pela simplicidade como são tratados, por mecanismos de depuração biológica em lagoas de estabilização, existe uma complexidade de parâmetros, ainda merecedores de um estudo fundamental.

A busca de novas tecnologias que possibilitem soluções de baixo custo, adaptadas às condições locais, tem sido amplamente incentivada, principalmente nos países em desenvolvimento, devido ao baixo custo de implantação e facilidade operacional (Teixeira Pinto e Onoyama, 1991), aliada à efetiva remoção de microorganismos patogênicos.

O uso das primeiras lagoas de estabilização foi constatado no início deste século na cidade de Santo Antonio nos Estados Unidos. Em fins da década de 50 e, principalmente, durante a década de 60, as lagoas de estabilização despertaram mais interesse, passando a ser amplamente usadas, não apenas como processo de tratamento de águas residuárias domésticas, mas, também, como processo de resíduos industriais.

No Brasil, a primeira lagoa construída dentro de critérios técnicos ocorreu em São José dos Campos no Estado de São Paulo, em 1960. Até 1964 prevalecia a tendência de se optar pela utilização de processos convencionais de tratamento de águas residuárias, tais como: filtros biológicos e lodos ativados. Porém, como é sabido, mesmo nos países desenvolvidos, nos quais os governos dispõem de consideráveis recursos financeiros, existe grande dificuldade de créditos, apesar de possuírem planejamentos econômicos bem sucedidos e recentes, visando problemas de tomada de decisão entre várias alternativas de investimento.

Um dos mais importantes problemas para as nações em desenvolvimento é conseguir recursos para investir em infra-estrutura e principalmente no setor de saneamento. Contudo, tendo em vista o alto custo de tecnologia de sistemas convencionais de tratamento de águas residuárias, existe a necessidade de desenvolvimento de métodos de baixo custo de tratamento dos despejos nos países menos desenvolvidos, os quais não podem construir estações de tratamento convencionais (Khan e Ahmad, 1992). Estes sistemas têm como principais desvantagens: alto custo, construção complexa, necessidade de energia elétrica, além de operadores especializados.

## **1.2. O problema**

O crescimento intenso e desordenado de criação de suínos, fundamentalmente na Região Oeste Catarinense, torna muitas vezes difícil o seu planejamento. Assim, com os elevados volumes de dejetos produzidos nas instalações suinícolas, tanto os médios quanto os grandes produtores têm excedente de resíduos orgânicos que precisam ser tratados eficientemente para eliminar ou, pelo menos, minimizar os problemas de degradação ambiental gerados por esta atividade, os quais se apresentam como grandes preocupações à população. É conveniente salientar que os sistemas que são utilizados para tratamento de dejetos suínos em Santa Catarina são construídos sem critérios científicos, com operação deficiente, trazendo conseqüentes problemas ambientais como contaminação dos corpos de água receptores desses efluentes e desenvolvimento de maus odores (Costa et al, 1995a). Outro aspecto relevante citado por Belli Filho e Borges de Castilhos (1991) é a elevada carga orgânica poluidora proveniente das

instalações de suinocultura que, na sua maior parte, funcionam sem unidades de tratamento e sem a valorização de seus dejetos. Por outro lado, a qualidade do efluente tratado não passa por monitoramento periódico, apresentando, em sua maioria, apenas uma boa remoção de carga orgânica (DBO), não existindo nenhuma preocupação com a remoção dos nutrientes (N, P) e dos microorganismos patogênicos (Costa, 1997).

Esses dejetos, quando lançados aos mananciais, sem tratamento podem estimular o crescimento e a multiplicação de bactérias e fungos e, estes, por sua vez, causam uma acentuada depleção de oxigênio, aliada a uma intensa eutrofização. Assim, os mananciais de água existentes estão comprometidos pelas contaminações bacteriológica e química. Essas contaminações não ficam restritas apenas ao município onde são lançados, uma vez que os mananciais podem atravessar vários municípios. Portanto não é correto que um deles venha a captar água já poluída advinda de outro município poluidor.

Para o controle da poluição ambiental proveniente dos dejetos de suínos no Brasil, existem poucos estudos desenvolvidos para a aplicação de metodologias e tecnologias voltadas para a redução dos impactos causados sobre o meio ambiente. A falta de pesquisas e estudos efetivos consistentes desta área tem levado os técnicos brasileiros a apresentarem soluções baseadas em experiências de outros países, na busca de parâmetros reais de funcionamento dos sistemas de tratamento na remoção da matéria orgânica, de nutrientes e de microorganismos patogênicos.

### **1.3. Importância do trabalho**

A suinocultura é uma atividade relevante tanto em termos econômicos como sociais. No entanto, sua exploração vem sendo considerada pelos órgãos de fiscalização e proteção ambiental como uma atividade potencialmente causadora de degradação do ambiente, por apresentar grandes produções de resíduos orgânicos, que são altamente poluentes, causando sérios problemas ambientais e de saúde pública. Dos dejetos produzidos no Brasil, a maior parte de todo volume não sofre qualquer tipo de tratamento ou de aproveitamento, lançando diariamente em torno de 185.000 m<sup>3</sup> de carga orgânica biodegradável no meio ambiente. Pois,

de acordo com Hermanson (1993) e com Swine Manure Management Planning (1997), suínos na fase de terminação (68 kg) produzem volume de dejetos, em média, de 5,7 litros/dia. Estudos realizados no Brasil por Konzen (1980) constataram produção de dejetos líquidos, em média, de 7,0 litros/suíno.dia nas fases de crescimento e terminação (25 - 100 kg). Assim, o volume de dejetos produzido diariamente em Santa Catarina supera os 26.000 m<sup>3</sup>.

O suíno atual é criado em instalações confinadas, sem acesso à terra, “extremamente limpas” e desinfetadas. Sua sanidade melhorou drasticamente em virtude desses avanços nas instalações e manejo. Infelizmente, a evolução dos sistemas de confinamento dos animais, adotados pelos suinocultores catarinenses a partir da década de sessenta, produz elevadas quantidades de resíduos orgânicos através do uso da água para a higienização das baias.

O uso d'água tem por finalidade diluir a concentração das fezes e urina produzidas recentemente e tratá-las como resíduos líquidos, tornando seus manejos mais fáceis (Andreadakis, 1992). Porém, este aumento de dejetos e a sua diluição trouxeram aos produtores sérios problemas de disposição, já que os métodos tradicionais de pré-tratamento, como armazenamento dos dejetos através de esterqueiras e bioesterqueiras, para posteriormente serem usados no solo como adubo, na maioria das situações não são aplicáveis por apresentar áreas com limitações topográficas, dificultando o uso de tratores adequados à distribuição dos dejetos nas lavouras. Esta situação, aliada aos investimentos para viabilizar a sua utilização, está acima da capacidade dos pequenos e médios produtores.

O Brasil como um todo não trata corretamente a questão de saneamento básico e, por isso, vem enfrentando graves problemas em virtude da escassez de recursos financeiros e, sobretudo, pelo alto custo das instalações convencionais. Contudo nele existem condições climáticas bastante favoráveis, principalmente a temperatura e a luz solar, e áreas de terrenos disponíveis para o uso das lagoas de estabilização. McGarry e Pescod (1970), Kawai et al (1981), Mendonça (1990) e Puskas et al (1991) salientam que estes sistemas de tratamento apresentam custos relativamente baixos para sua construção e simplicidade de operação. Além disso, reduz o risco de contaminação (Ciafardini e Barbieri, 1982).

Os dejetos de suínos são altamente concentrados, com valor de Sólidos Totais em torno de 20.000 mg/l e DQO 30.000 mg/l (Costa et al, 1995a; 1995b e Medri et al, 1995a; 1995b), necessitando de uma etapa preliminar de tratamento, visando diminuir a carga orgânica na fração líquida dos dejetos e concentrar a fração sólida para a utilização como fertilizante do solo. Assim reduz-se o volume a ser destinado à lavoura e aumenta-se a concentração de nutrientes por unidade de volume, evitando-se que seja levada a água para a lavoura, o que aumentaria o volume e o número de viagens para transportar o dejetos e, conseqüentemente, diminuiria o assoreamento da lagoa, aumentando a sua vida útil.

Vários sistemas de armazenamento e de tratamento de dejetos suínos têm sido utilizados em Santa Catarina, como: esterqueiras, bioesterqueiras e lagoas de estabilização (anaeróbias, facultativas, de maturação/aeróbias e de aguapés). Os sistemas de esterqueiras e bioesterqueiras consistem em promover o armazenamento dos dejetos para posterior valorização na agricultura como fertilizante (Gosmann, 1997; Belli Filho et al, 1997), enquanto estudos recentes realizados por Costa et al (1995a, 1995b, 1997b), Oliveira et al (1995), Medri et al (1996a, 1996b) indicam que um sistema de lagoas de estabilização tem se destacado para tratamento da fração líquida dos dejetos suínos na Região Oeste deste Estado, uma vez que elas apresentam um excelente desempenho quanto à eficiência de remoção da matéria orgânica, dos sólidos, dos nutrientes e de coliformes fecais. É conveniente ressaltar que os dejetos suínos são considerados como um produto fertilizador dos solos, apenas as quantidades excedentes que não foram utilizadas devem ser tratadas antes de seu lançamento nos cursos d'água. Além do mais, existem outras formas de disposição e de tratamento de resíduos orgânicos. A Figura 1.2 elaborada por Costa (1997) apresenta algumas das principais práticas para a disposição e/ou tratamento dos dejetos.

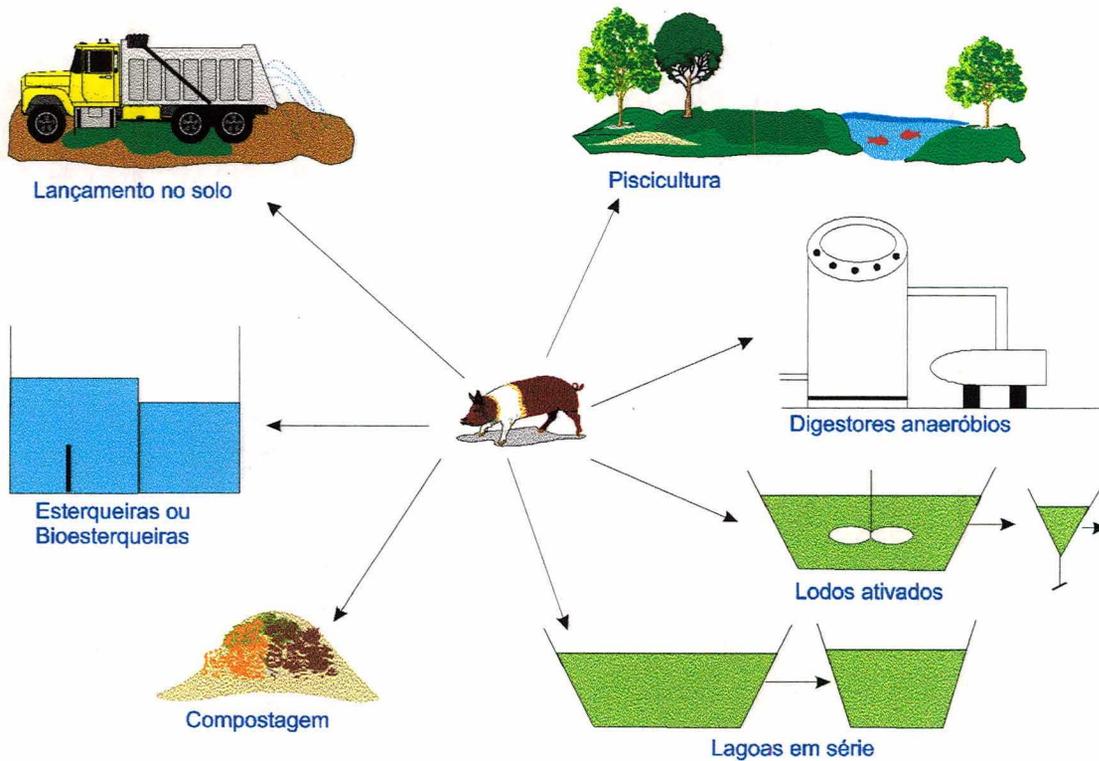


Fig. 1.2. Exemplos de algumas formas de disposição e/ou tratamento de dejetos de suínos.  
 Fonte: Costa (1997).

Outro ponto importante deste trabalho é quanto à sua otimização, onde obtém-se os modelos matemáticos através da estrutura básica dos custos de aquisição da terra, de implementação e de manutenção do sistema, além dos modelos matemáticos obtidos de dados experimentais das lagoas de estabilização. A otimização do sistema ocorre com base na minimização dos custos para o valor presente.

#### 1.4. Objetivos

Este trabalho tem como *objetivo geral* o desenvolvimento de uma abordagem fundamentada através de critérios científicos na determinação de parâmetros de projetos e de condições de funcionamento das lagoas anaeróbias, facultativas e de aguapés, para a otimização do sistema de tratamento, aplicadas aos resíduos orgânicos de suínos, levando em consideração os aspectos econômicos.

*Concomitantemente, tem como objetivos específicos:*

- avaliar o desempenho de dois sistemas de lagoas de estabilização em escala real (EMBRAPA - Concórdia/SC e COOPERCENTRAL AURORA - Chapecó/SC) na eficiência de remoção de matéria orgânica (DBO, DQO), dos sólidos (ST, SF e SV), dos nutrientes (NT e PT) e de coliformes fecais;

- estudar o comportamento do funcionamento do sistema de lagoas para tratamento de dejetos suínos, tais como: tempo de detenção e taxa de aplicação de matéria orgânica;

- apresentar os valores das constantes de degradação da matéria orgânica (DBO, DQO) das lagoas anaeróbias e facultativas e de aguapés e do Nitrogênio Total (NT) para as lagoas facultativas e de aguapés para dejetos suínos;

- verificar a aplicabilidade dos principais modelos existentes ao dimensionamento de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos em condições da Região Oeste de Santa Catarina;

- verificar o regime de fluxo hidráulico mais adequado inerente a cada lagoa do sistema;

- apresentar uma análise econômica do uso da área de terra ocupada pelo sistema de lagoas de estabilização, de sua construção e operação;

- elaborar um modelo matemático de minimização de custos do sistema de lagoas de estabilização de resíduos e implantá-lo em linguagem computacional.

### **1.5. Hipóteses**

Tem-se como hipótese geral no presente estudo: *“é possível através da otimização matemática do sistema de tratamento de dejetos suínos, adequar o efluente final, em termos de matéria orgânica e de nitrogênio, aos padrões de lançamento estabelecidos pela Legislação Ambiental, reduzindo ao mesmo tempo, seus custos totais”*.

*Como hipóteses subjacentes tem-se:*

- é possível efetuar o tratamento de dejetos suínos através de lagoas de estabilização;
- é possível obter um efluente final em termos de matéria orgânica inferior ao padrão estabelecido pela Legislação Ambiental;
- é possível minimizar os custos de tratamento de dejetos de suínos em lagoas de estabilização, mantendo-se os padrões ambientais de lançamento dos efluentes.

### **1.6. Limitações do trabalho**

Este trabalho se encontra limitado para regiões ou países onde existam condições favoráveis climatológicas, como temperatura e luz solar, além de áreas de terrenos disponíveis para a construção do sistema de lagoas de estabilização.

No que se refere à otimização do sistema, o modelo matemático está limitado nos parâmetros que estão relacionados: degradação com tempo de detenção, como DBO e DQO para todas as lagoas, e Nitrogênio para as lagoas facultativas e de aguapés. Para o aprimoramento do modelo

deve-se fazer um estudo mais detalhado do nitrogênio total, verificando os principais fatores que afetam a sua remoção em cada tipo diferente de lagoa e incorporá-lo ao modelo, uma vez que este parâmetro é fundamental para o tratamento de dejetos suínos por apresentar elevadas concentrações e ser resistente à biodegradação, principalmente nas lagoas anaeróbias.

### **1.7. Linha de pesquisa**

O trabalho se enquadra em duas linhas de pesquisas de Curso de Pós-Graduação: Engenharia de Produção e Engenharia Sanitária e Ambiental.

Por um lado, o estudo está diretamente ligado à área de Engenharia de Produção, já que envolve aplicações de métodos qualitativos e quantitativos para articular os meios de produção de uma empresa, de forma que se possa tirar o maior proveito possível. Por outro lado, está diretamente relacionado com a área de Engenharia Sanitária e Ambiental, pois trata de condições ambientais e de saúde pública.

### **1.8. Estrutura do trabalho**

Este trabalho se apresenta estruturado em sete capítulos:

O primeiro capítulo apresenta os aspectos preliminares do trabalho, como: a problemática, a justificativa para o estudo, demonstrando-se a importância do trabalho, os objetivos da tese, as hipóteses e as limitações e a linha de pesquisa.

No segundo capítulo é feita uma revisão da fundamentação teórica relacionada com as pesquisas afins ao assunto desta tese, apresentando os modelos matemáticos pertinentes a tratamentos de resíduos orgânicos.

O capítulo três descreve, de forma detalhada, a metodologia utilizada para que os objetivos do trabalho fossem alcançados.

No capítulo quatro encontram-se os resultados obtidos durante o experimento, assim como as discussões dos mesmos.

O capítulo quinto reserva uma descrição minuciosa sobre as modelagens matemáticas de custos da terra, de construção e de manutenção que serão utilizadas para a otimização do sistema.

O sexto capítulo é destinado às aplicações do modelo, utilizando-se os dados reais obtidos no sistema experimental de lagoas de estabilização do CNPSA, assim como os dados de custos de capital e operacional.

As conclusões da pesquisa sobre a metodologia proposta e as recomendações estão no sétimo capítulo.

Na seqüência, apresenta-se as referências bibliográficas consultadas para a elaboração do trabalho, e os anexos contendo gráficos e quadros auxiliares para a aplicação da metodologia proposta, que visam possibilitar melhor entendimento do trabalho, assim como aplicações do modelo.

## CAPÍTULO 2

### 2. REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1. Introdução

As lagoas de estabilização são basicamente bacias terrestres, projetadas dentro de critérios técnicos e científicos com a intenção de tratar águas residuárias brutas ou efluentes pré-tratados. Elas recebem uma variedade de águas residuárias domésticas e resíduos industriais complexos e funcionam sob uma ampla variação de condições ambientais (Middlebrooks, 1987). Os resíduos são submetidos à degradação biológica natural, envolvendo principalmente bactérias e algas (Silva e Mara, 1979), de maneira a estabilizar, ou seja, mineralizar o máximo possível de sua carga orgânica e destruir microorganismos patogênicos e não patogênicos nelas existentes. Segundo Dorego e Leduc (1996), as lagoas de estabilização são modeladas para conter águas residuárias até que o efluente desejado seja obtido através da ação dos microorganismos presentes no sistema. O processo de tratamento é realizado pela capacidade destes microorganismos de quebrar as moléculas orgânicas complexas em substâncias inorgânicas mais simples no processo de síntese celular.

As lagoas de estabilização baseiam-se em dois princípios fundamentais: respiração e fotossíntese. O primeiro constitui-se no processo pelo qual os microrganismos conseguem sintetizar a matéria orgânica. A maior parte dos seres fotossintetizantes, que são todos vegetais, desprende oxigênio no meio, como subproduto de sua atividade. Estabelece-se assim, um círculo vicioso, no qual os organismos fotossintetizantes estabilizam a matéria orgânica liberando oxigênio no meio, e os organismos heterótrofos alimentam-se da matéria orgânica, utilizam o oxigênio para sua oxidação e liberação de  $\text{CO}_2$  necessário à fotossíntese.

O sistema de lagoas de resíduos orgânicos tem sido considerado como sendo uma das soluções mais convenientes para o tratamento dos mesmos, nos casos de médios e grandes produtores,

principalmente nos países em desenvolvimento, em virtude de sua alta eficiência, quando bem manipulada e com custos de operação muito inferiores aos das estações convencionais de tratamento de águas residuárias. Além disso, os sistemas de lagoas estão associados a uma simples operação, sem necessidade de pessoas qualificadas (Mara e Pearson, 1986; Marques e d'Avila, 1995).

Para Moreno et al (1988) e Mendonça (1990), sistemas de lagoas de estabilização são considerados entre os métodos de tratamento de águas residuárias e industriais como sendo mais fáceis, econômicos e eficientes. Suas vantagens em relação a outros tipos de tratamento têm sido destacadas como: alta remoção da carga orgânica, redução de coliformes fecais, além dos custos de investimento e manutenção mínimos. Para Clark et al (1976), Teltsch e Katznelson (1978) e Cronholm (1980), além do baixo custo de construção e manutenção, está aliado também a reduções de riscos de contaminação devido à diminuição de microorganismos fecais. Já os processos convencionais necessitam de habilidade na operação, além do alto consumo de energia elétrica (Polprasert et al, 1992).

Arthur (1983), Mara e Pearson (1986) e Marques e d'Ávila (1995) apontam as principais vantagens dos sistemas de lagoas sobre outros métodos de tratamento de resíduos orgânicos, tais como: alta eficiência no tratamento, flexibilidade e simplicidade no sistema e baixo custo. Como desvantagem, a principal causa é atribuída à necessidade de grande área para sua construção.

## **2.2. Produção de dejetos de suínos**

A suinocultura, com a modernização dos sistemas de confinamento, gera como efluente um resíduo com elevadas concentrações orgânicas, resultante dos excrementos sólidos e líquidos dos animais. A quantidade de excrementos produzida por dia e o teor de umidade variam de acordo com o desenvolvimento corporal dos suínos, o tipo de alimentação, a quantidade de água ingerida e a estação do ano (Silva, 1973). Além disso, o aumento dos resíduos estão ligados à quantia de água adicionada na higienização das baias (Andreadakis, 1992).

Em 1974, Loehr argumenta que a produção diária de estrume úmido está na faixa de 6% do peso vivo do animal, com 75% de umidade, ou seja, produção de 2,7 kg de estrume por dia por suíno de 45 kg. Conrad e Mayrose (1971) encontraram produção de estrume de suínos em crescimento e terminação variando de 5 a 8% do peso vivo por dia, da qual 10 a 15% era matéria seca. Usando média de 6,5% de resíduo e 12,5% de matéria seca por suíno de 45 kg, o estrume e a matéria seca produzidos foram de 2,9 kg e 0,36 kg, respectivamente. Segundo Taiganides (1977), a produção de resíduos de suínos pode ser admitida como sendo diretamente proporcional ao peso vivo do animal. Porém, há uma grande variabilidade nos dados publicados em relação às quantias de excrementos produzidas para todos os tipos de animais. No caso de suínos, a produção de estrume é de 5,1% do seu peso vivo, com uma variação de 20%.

Silva (1973) notou uma produção de 5 kg de estrume fresco por dia por suíno de 100 kg (5% de peso vivo) e teor de umidade de 76%. Jelinek (1977) registrou valores decrescentes de 8,5 a 4,9% do peso vivo, considerando a faixa dos 16 aos 100 kg/animal, isto é, 8,5% para faixa de 16 a 30 kg; 6,3% entre 31 e 65 kg e 4,9% entre 66 e 100 kg por suíno. Ao passo que suínos de 5 a 15 kg produzem 7,2% de excremento do seu peso vivo. Evans et al (1978) indicam volume de estrume de 4,5 litros/dia por suíno com peso entre 20 e 100 kg. Contrariamente, Konzen (1980), em seu trabalho de dissertação no Brasil, argumenta que suínos nas fases de crescimento e terminação (25 a 100 kg) produzem volume de dejetos, em média, de 7 litros/suíno/dia e Oliveira et al (1993) notaram produção média de dejetos líquidos de 8,6 litros/dia/suíno nas diferentes fases produtivas. Brumm e Sutton (1979) verificaram que valores médios de produção de resíduos são de 6,9 kg/dia na primavera e de 8,4 kg/dia no verão. Em 1981, Merkel elaborou a Tabela 2.1, a qual representa a quantia de dejetos produzida por dia e por suínos em função de suas categorias.

Tabela 2.1 - Produção média diária de dejetos nas diferentes fases dos suínos.

| <b>Categoria animal</b> | <b>Peso médio (kg)</b> | <b>Dejetos produzidos (kg/dia)</b> |
|-------------------------|------------------------|------------------------------------|
| Creche                  | 16                     | 1,1                                |
| Crescimento             | 30                     | 1,9                                |
| Terminação              | 68                     | 4,5                                |
| Gestação                | 125                    | 4,1                                |
| Porcas + leitões        | 170                    | 15,0                               |
| Cachaço                 | 100                    | 5,0                                |

Fonte: Merkel (1981)

Em 1983, Overcash et al, através de pesquisas efetuadas sobre carga de resíduo bruto gerada por diferentes ciclos de suínos, elaboraram a Tabela 2.2, a qual indica a DBO<sub>5</sub> per capita por suíno em função de sua categoria.

Tabela 2.2 - DBO<sub>5</sub> per capita nas diferentes fases dos suínos.

| <b>Categoria animal</b> | <b>Peso animal (kg)</b> | <b>DBO<sub>5</sub> (kg/animal/dia)</b> | <b>DBO<sub>5</sub> (kg/dia/kg animal)</b> |
|-------------------------|-------------------------|--|---|
| Creche                  | 16                      | 0,03                                   | 0,00200                                   |
| Crescimento             | 30                      | 0,06                                   | 0,00200                                   |
| Terminação              | 68                      | 0,14                                   | 0,00200                                   |
| Gestação                | 125                     | 0,18                                   | 0,00145                                   |
| Porcas + leitões        | 170                     | 0,34                                   | 0,00200                                   |
| Cachaço                 | 160                     | 0,18                                   | 0,00114                                   |

Fonte: Overcash et al (1983), p. 201

### 2.3. Consumo de água por suíno

Outro aspecto relevante na quantidade total de dejetos é a produção de urina (a qual é função direta da água ingerida), do volume de água desperdiçada pelos bebedouros e da água utilizada na higienização das baias. Loehr (1974), em seus trabalhos publicados nos Estados Unidos, indica que a quantidade de urina é da ordem de 30% do peso total dos excrementos. Conrad e Mayrose (1971) relatam que a quantia média de água ingerida gira em torno de 2 a 2,5 kg de água por quilograma de matéria seca consumida.

Segundo Silva (1973), a quantidade de água de diluição de resíduos é variável de acordo com o tipo de instalação, disponibilidade de água e hábitos do criador, e está entre 5 a 10 litros/cab/dia. Mamede (1980), em seu trabalho de dissertação referente a suínos, percebeu que estes, nas fases de crescimento e terminação, consomem, em média, 5,5 litros/suíno/dia, enquanto Konzen (1980) encontrou 8,6 litros/suíno/dia.

O uso da água tem como finalidade diluir a concentração das fezes e urinas produzidas recentemente e tratá-las como resíduos líquidos, tornando seus manejos mais fáceis (Andreadakis, 1992). Todavia, o mesmo autor menciona que é duvidoso que esta diluição seja sempre desejável, já que aumenta o volume do resíduo e pode representar dificuldade no tratamento. O bom seria empregar métodos eficientes de manejo a fim de minimizar o consumo d' água. O autor continuou dizendo que o volume de água por suíno varia amplamente de 6 a 45 litros/suíno/dia. No entanto, o volume de dejetos produzidos por suíno diário por unidade decresce à medida que aumenta o número de animais. Existem estudos anteriores realizados pelos autores (Oleszkiewicz e Koziarski, 1981) e Taiganides (1986); sendo que o primeiro indica que a quantia de água usada pelos suinocultores está entre 20 e 40 litros/suíno/dia, e o segundo menciona que o uso da água em lugares fechados é da ordem de 20 litros/suíno/dia. Contudo, em sistemas de descargas, o volume de água usado é estimado em 30 litros/suíno/dia. Barbari e Rossi (1992) elaboraram a Tabela 2.3, que representa as necessidades de água por suíno em função de suas categorias. Dessa forma, a tabela permite dar uma idéia do comportamento em relação ao consumo de água nas diversas fases do ciclo de produção.

Tabela 2.3 - Exigência de água dos suínos, de acordo com a fase do ciclo de produção.

| <b>Categoria do suíno</b>             | <b>Litros d'água/suíno/dia</b> |   |      |
|---------------------------------------|--------------------------------|---|------|
| Leitão em amamentação                 | 0,1                            | a | 0,5  |
| Leitão em desmamentamento (7 a 25 kg) | 1,0                            | a | 5,0  |
| Suíno em crescimento (25 a 50 kg)     | 4,0                            | a | 7,0  |
| Suíno em engorda (50 a 100 kg)        | 5,0                            | a | 10,0 |
| Suíno em engorda (100 a 150 kg)       | 7,0                            | a | 15,0 |
| Porca desmamada                       | 5,0                            | a | 10,0 |
| Porca em gestação                     | 10,0                           | a | 20,0 |
| Porca na maternidade                  | 20,0                           | a | 35,0 |
| Cachaço                               | 10,0                           | a | 15,0 |

Fonte: Barbari & Rossi (1992)

## 2.4. Principais indicadores de poluentes

### a) avaliação da poluição orgânica

Entre os vários parâmetros indicadores de poluição, a *Demanda Bioquímica de Oxigênio* (DBO) e a *Demanda Química de Oxigênio* (DQO) apresentam-se como dos mais importantes parâmetros que classificam a poluição de uma água residuária em fraca, média e forte.

A DBO está associada à fração biodegradável dos compostos orgânicos carbonáceos. Portanto, retrata a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar, através de processos biológicos, a matéria orgânica presente nos dejetos. É uma indicação indireta do carbono orgânico biodegradável. O teste padrão realizado em laboratório é feito em 5 dias (DBO<sub>5</sub>), através de diluições e incubação das amostras a 20 °C, sem a presença da luz. Com esgotos domésticos, esse tempo de 5 dias implica em cerca de 70 a 80 % de degradação da matéria carbonácea.

A DQO representa a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar quimicamente as matérias orgânica e inorgânica oxidáveis de uma água, ou seja, é a quantidade de oxigênio consumida por diversos compostos sem a intervenção de microorganismos. É uma indicação indireta do teor do carbono orgânico através do consumo do oxigênio no processo de oxidação da matéria orgânica presente na água. O teste é realizado através do uso de oxidante forte, o dicromato de potássio, em meio ácido e temperatura elevada, durante duas horas.

O Oxigênio Dissolvido (OD) apresenta-se como um bom indicador de poluição, sua concentração é de 9 mg/l, para água limpa a 20 °C e ao nível do mar. Em meio onde a matéria orgânica é altamente concentrada, o OD poderá ser zero mg/l, enquanto que em presença de elevada concentração de algas pode-se observar valores de super saturação.

### b) avaliação da poluição mineral

Os parâmetros mais relevantes para a medida da poluição mineral são: pH, Oxigênio Dissolvido, Sólidos (ST, SF e SV) e nutrientes (N e P).

O potencial de hidrogenação (pH) é um parâmetro importante, pois condiciona as reações químicas do meio.

Os sólidos são os responsáveis pelo aparecimento da cor e turbidez nas águas. Os Sólidos são classificados segundo suas características químicas em Sólidos Fixos (SF) e Sólidos Voláteis (SV), os quais juntos formam os Sólidos Totais (ST). Os Sólidos Totais em águas residuárias caracterizam o teor da matéria seca das mesmas, os Sólidos Voláteis indicam uma estimativa da matéria orgânica existente no resíduo, enquanto que os Sólidos Fixos representam a matéria inorgânica, ou seja, o teor dos sólidos minerais.

O Nitrogênio e o Fósforo são os principais nutrientes responsáveis pelo crescimento e reprodução dos microorganismos que promovem a estabilização da matéria orgânica presente nos despejos.

Os compostos nitrogenados nos despejos domésticos são encontrados na forma de Amônia, Nítritos, Nitratos e Nitrogênio Orgânico. A Amônia, juntamente com o Nitrogênio Orgânico, Nítrito e Nitrato, resulta no Nitrogênio Total (NT), enquanto que o Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) é a soma do Nitrogênio Orgânico com a Amônia.

Nos despejos o Fósforo aparece sob as formas de Ortofosfatos e Polifosfatos, que são solúveis, e nas formas de complexos: Fosfatos Orgânicos insolúveis, Fosfatos precipitados, que são pouco solúveis, e Ácido Fosfórico insolúvel. A determinação dos Fósforos Orgânico e Inorgânico denomina-se de Fósforo Total (PT).

## 2.5. Classificação das lagoas de estabilização

As lagoas de estabilização são classificadas de acordo com a atividade metabólica predominante na degradação da matéria orgânica, tais como: *anaeróbias*, *facultativas* e *de maturação ou aeróbias*, como variantes segundo a intensificação do processo, como por exemplo, lagoas com plantas macrófitas, aeradas, de alta taxa de degradação e outras. Elas podem ser distribuídas

em diferentes números e combinações, a fim de alcançar a qualidade padrão requerida (Pearson et al, 1995).

As lagoas anaeróbias são normalmente empregadas para estabilização de altas cargas orgânicas aplicadas e atuam como unidade primária em um sistema em série de lagoas. Sua função principal é a degradação da matéria orgânica (DBO e DQO) envolvendo a participação de bactérias facultativas e estritamente anaeróbias.

As lagoas facultativas são o tipo mais comum e operam com cargas orgânicas mais leves que as utilizadas nas lagoas anaeróbias, permitindo um desenvolvimento de algas nas camadas mais superficiais e iluminadas. Essas algas, através da atividade fotossintética, oxigenam a massa líquida da lagoa, modificam o pH e consomem nutrientes orgânicos (Sousa, 1994).

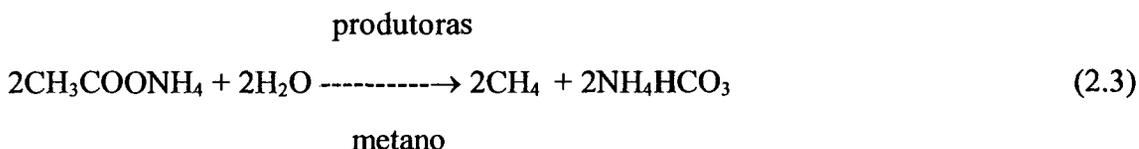
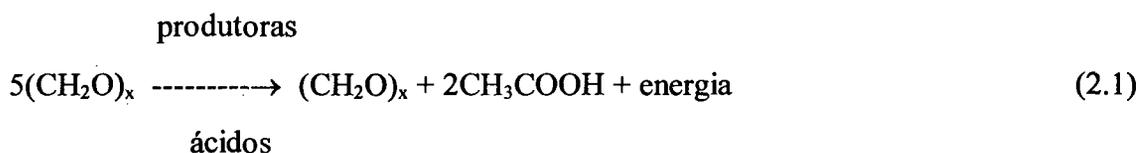
As lagoas de maturação são predominantemente aeróbias, em virtude da remoção de grande parte da carga orgânica nos tratamentos precedentes, tendo como objetivo principal a remoção de organismos patogênicos e de nutrientes.

### **2.5.1. Lagoas anaeróbias**

São reatores biológicos modelados para receber altas cargas orgânicas por unidade de volume do reator, fazendo com que a taxa de consumo de oxigênio seja muito superior à taxa de produção, sendo portanto completamente isentas de oxigênio dissolvido e de atividade fotossintética, mas associando os mecanismos de fermentação e respiração anaeróbicos. Nesses reatores, segundo Oleszkiewicz e Koziarski (1986), a maior parte da matéria orgânica é destruída por via metanogênica e sulfidogênica. Segundo Merkel (1981), o tratamento anaeróbio é um processo seqüencial que envolve três estágios: na primeira fase, hidrólise de materiais complexos, o material orgânico complexo é transformado em matéria orgânica simples solúvel via hidrólise e enzimática. Na segunda etapa, produção de ácidos, que são formados pelas bactérias anaeróbias e facultativas, convertendo os compostos orgânicos solúveis em ácidos orgânicos pelas bactérias anaeróbias conhecidas como produtoras de ácidos

e, no terceiro período, fermentação metanogênica, os ácidos orgânicos simples são convertidos em metano e dióxido de carbono através de bactérias anaeróbias produtoras do metano. São usadas com grandes vantagens como tratamento primário de águas residuárias, industriais e/ou de dejetos suínos com grande concentração de compostos orgânicos e altos teores de sólidos.

As principais reações envolvidas na digestão anaeróbia são descritas pelas seguintes seqüências de equações (Middlebrooks et al, 1982), citado por Oliveira (1990).



Os principais passos no processo de digestão anaeróbia são designado como a fermentação ácida (eq. 2.1) e fermentação metânica (eq. 2.3).

O tratamento biológico de resíduos orgânicos, neste tipo de lagoas, é normalmente projetado para a biodegradação máxima da matéria orgânica das águas residuárias (Blouin et al, 1988). Essa degradação é dependente da atividade metabólica dos microorganismos nativos. Contudo, dejetos de suínos contêm alta proporção de sólidos suspensos que resistem à degradação biológica (Robinson et al, 1971). Para Evans et al (1980), no que diz respeito à DQO, há sempre uma fração não biodegradável que é proporcional à concentração do resíduo na entrada da lagoa. Essa fração é aproximadamente 40% da matéria orgânica total (Andreadakis, 1992). Para Orhon et al (1993) e Germirli et al (1993), a fração não biodegradável do afluente se torna grande obstáculo do tratamento e constitui-se em um componente básico do efluente. Estudos

233 5546

2330533

234.5342

realizados pela ASAE (1990) caracterizam que certa fração da alimentação dos animais (suínos) é classificada como sólidos fixos que varia com a comida, mas tipicamente será de 15 a 30% da ração. Esta fração acumulará no fundo da lagoa.

As lagoas anaeróbias têm como propósito principal a estabilização parcial da matéria orgânica e não a purificação da água para posterior descarga em corpos receptores (Loehr 1974). Elas não dependem da ação fotossintética das algas, e suas condições ótimas ocorrem na ausência de oxigênio. Assim, são construídas com maior profundidade para promover a condição de anaerobiose, reduzindo a área superficial, minimizando odores, diminuindo as variações de temperatura durante os meses mais frios e facilitando as operações de remoção do lodo (EMBRAPA, 1995). Podem ser descritas como processo de decomposição de matéria orgânica, por bactérias produtoras do metano. Porém, Saqqar (1988), através de experimentos, constatou que as lagoas anaeróbias mais profundas produziam uma taxa de remoção de coliformes fecais mais baixa do que outras lagoas mais rasas. Os fatores que contribuem para a baixa remoção desses patógenos são: o pH, que é praticamente neutro, há abundância de nutrientes e ausência de predadores de bactérias.

### **2.5.2. Lagoas facultativas**

São reatores dimensionados para receber tanto águas residuárias brutas (lagoa facultativa primária) quanto águas residuárias que tenham recebido algum tratamento anterior (lagoa facultativa secundária). Contudo, de acordo com Mara e Pearson (1986), a sobrecarga neste tipo de lagoa pode mudar a cor do verde para o vermelho, devido à proliferação das bactérias de enxofre no lugar das algas. O termo facultativo significa condições aeróbias próximas à superfície superior e anaeróbias próximas ao fundo da lagoa, onde a matéria orgânica em suspensão é sedimentada.

Essas lagoas funcionam através da atividade fotossintética das algas sob a influência da luz solar e da ação das bactérias. O surgimento das algas é função da presença de nutrientes oriundos da mineralização da matéria orgânica afluyente pelas bactérias (Sousa, 1994). Esta

forma de oxidação, por ser anaeróbia, implica no consumo de oxigênio devido à respiração dos microorganismos decompositores, principalmente as bactérias heterotróficas aeróbias. As bactérias, na presença de oxigênio, convertem a matéria orgânica a compostos simples e inertes como o dióxido de carbono e água, além de sais de nitrogênio e fósforo. Esses compostos inorgânicos são utilizados pelas algas e através da fotossíntese ocorre a liberação do oxigênio molecular. Este, por sua vez, é utilizado pelas bactérias aeróbias e facultativas na sintetização da matéria orgânica.

No fundo da lagoa, em condições anaeróbias, a matéria orgânica sedimentada também necessita ser estabilizada. Porém, esta estabilização, por ser anaeróbia, não traduz em consumo de oxigênio e libera gases como metano, carbônico, sulfeto de hidrogênio e nitrogênio amoniacal, os quais se deslocam para a superfície da lagoa e grande parte se desprende para a atmosfera.

Nas lagoas facultativas secundárias, as diferentes razões entre comprimento, largura e profundidade têm pouco efeito na qualidade do efluente em termos de  $DBO_5$ , SS e CF (Pearson et al, 1995). Assim, se aumentar a profundidade das lagoas facultativas e, portanto, o tempo de detenção hidráulica, mantendo a mesma carga orgânica superficial, não melhora significativamente a qualidade físico-química ou microbiológica do efluente. Os autores ainda continuam dizendo que alguns projetistas têm a tendência de aumentar a profundidade da lagoa como uma maneira de aumentar o tempo de detenção na série de lagoas, na crença de que isto produzirá uma melhor qualidade do efluente em termos de microbiologia.

### **2.5.3. Lagoas de maturação ou aeróbias**

São usadas como tratamento de descargas orgânicas leves provenientes de efluentes de outras lagoas. As eficiências de remoções de  $DBO$  e  $DQO$  são geralmente baixas (Sousa, 1987). Porém, a função principal é a destruição de microorganismos patogênicos, além da redução de nutrientes e sólidos em suspensão (Mara e Pearson, 1986).

Este tipo de lagoas para tratamento de águas residuárias compreende unidades rasas necessárias para manter as condições aeróbias. O desempenho da lagoa depende exclusivamente do oxigênio produzido pelas algas, sendo ele transferido quase que por toda a lagoa através da turbulência dos ventos. De acordo com Pearson et al (1995), reduzindo a profundidade da lagoa também reduz-se o tempo de detenção, mas isto não afeta a qualidade do efluente. Pelo contrário, isto traduz que as lagoas mais rasas são de melhor eficiência quanto à desinfecção natural do que as lagoas de maturação mais profundas.

## 2.6. Carga orgânica utilizada nas lagoas

Loehr (1974) cita que fluxos de carga orgânica entre 0,005 e 0,167 kg SV/m<sup>3</sup>/dia têm sido sugeridos para lagoas de estabilização anaeróbias de dejetos suínos. Safley (1996), em estudos desenvolvidos nos Estados Unidos, sugere carga orgânica volumétrica de 0,053 kg SV/m<sup>3</sup>/dia para o norte do País e de 0,069 kg SV/m<sup>3</sup>/dia para o sul. Também estudos mostram que altas taxas de cargas de 2,062 a 5,076 kg SV/m<sup>3</sup>/dia têm sido usadas com sucesso (Loehr, 1974).

Silva (1973) estudou, em escala piloto, dejetos de suínos com cargas orgânicas volumétricas de 0,03; 0,05 e 0,07 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia, com tempo de detenção de 30 dias e concluiu que a carga 0,05 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia apresentou o melhor desempenho. Loehr (1974) indica fluxo de carga orgânica volumétrica satisfatória de 0,24 a 0,32 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia para todos os tipos de dejetos de animais. Mara e Pearson (1986) recomendam que lagoas anaeróbias deveriam receber carga orgânica volumétrica de DBO<sub>5</sub> entre 0,1 e 0,3 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia, uma vez que valores menores que o primeiro limite impedem o desenvolvimento de condições anaeróbias e valores maiores que o segundo limite causam níveis inaceitáveis de odor liberado.

Com relação às lagoas aeróbias (natural), estudos realizados por Safley et al (1997) por toda parte dos Estados Unidos revelam as taxas máximas aceitas para essas lagoas, tais como: para climas quentes 56 kg DBO<sub>5</sub>/ha/dia e para climas frios 40 kg DBO<sub>5</sub>/ha/dia.

Chin e Ong (1993), pesquisando dejetos de suínos num sistema de tratamento em Cingapura, com capacidade de operar até 25.000 suínos, verificaram que após a sedimentação primária, a lagoa anaeróbia recebia carga orgânica em torno de 0,08 kg DBO/m<sup>3</sup>/dia e 0,11 kg SVT/m<sup>3</sup>/dia, tendo uma redução de 64% e 78%, respectivamente. Costa et al (1995a) estudaram dejetos de suínos em escala real com cargas orgânicas volumétricas que variaram de 0,03 a 0,12 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia em lagoas anaeróbias e observaram uma redução da ordem de 85% e 90% de DQO com tempo de detenção de 66 e 117 dias, respectivamente.

Ainda, no que diz respeito à carga orgânica, Chin e Ong (1993), em pesquisas desenvolvidas com sistema de tratamento de águas residuárias em Cingapura, com população de suínos variando de 12.000 a 25.000 e taxa de fluxo médio de 350 m<sup>3</sup>/dia, observaram que 20% era de dejetos suínos e o resto de água de lavagem. Notaram, ainda, altos níveis de compostos orgânicos e nutrientes, como a DBO<sub>5</sub> variando de 800 a 24.800 mg/l, DQO de 1.830 a 45.940 mg/l, SVT de 890 a 36.930 mg/l, nitrogênio de 770 a 4.420 mg/l e fósforo de 34 a 430 mg/l. Resultados parecidos foram encontrados por Martinez e Hao (1996), tais como: 66.000 mg/l de ST, 76.000 mg/l de DQO, 22.700 mg/l de DBO<sub>5</sub>, 5.225 mg/l de NTK e 3.450 mg/l de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, e por Jurkovic et al (1996) com valores médios de 36.179 mg/l de DQO, 14.335 mg/l de DBO<sub>5</sub>, 2.278 mg/l de NTK, 38.000 mg/l de SST e 29.700 mg/l de SSV.

Por outro lado, com relação aos dados *operacionais das lagoas*, Silva (1973), trabalhando com dejetos suínos em lagoas piloto, verificou redução de 90% de DBO<sub>5</sub> e 72% de ST com tempo de detenção de 30 dias. Ginnivan (1983) encontrou uma redução de 77 a 87% de ST, de 90 a 95% de DBO<sub>5</sub> e 99% de CF, com um tempo de detenção de 128 dias em lagoas experimentais. Azis e Ng (1992) verificaram remoção de resíduos de suínos variando de 80 a 88% de DBO<sub>5</sub>, de 70 a 82% de DQO, de 60 a 70% de NT e de 50 a 60% de PT, usando como processo de tratamento algas ativadas, com um período observado de 15 dias. Costa et al (1995a), em estudos de lagoas para tratamento de dejetos suínos, em escala real, encontraram uma remoção de 85% de DQO, 86% de ST, 77% de NT e 87% de PT, com tempo de detenção de 66 dias. Oliveira et al (1995) constataram remoção de 49% de DBO<sub>5</sub>, 46% de DQO, 50% de ST, 47% de NT, e 49% de PT em lagoas tratando dejetos suíno, para um tempo de detenção de 26 dias. Medri et al (1996a e 1996b) encontraram remoção na faixa de 80% de DQO e DBO, 69% de

SV, 35% de NT e 70 % de PT, com tempo de detenção de 35 dias. Bortone et al (1992), através de experimentos efetuados em reator, para tratamento de dejetos suínos, observaram remoção de 93% de DQO, 93% de NT e de 95% de PT. Germirli et al (1993) encontraram resultados similares, 93% de DQO, 95% de NT e 95% de PT para uma seqüência de reatores com fluxo descontínuo.

Oleszkiewicz e Koziarski (1981), em estudos de digestores anaeróbios, Polprasert et al (1992) e Bortone et al (1992), em pesquisas de lagoas em escala piloto, Costa et al (1995a e 1997b), Oliveira et al (1995) e Medri et al (1996a e 1996b), em trabalhos com lagoas de estabilização em escala real, notaram que resíduos de suínos contêm altas concentrações de compostos orgânicos e nutrientes. Aliado a estes, Oleszkiewicz e Koziarski (1981) encontraram pequenas quantidades de metais, Costa et al (1995a), Oliveira et al (1995), Chin e Ong (1993) comprovaram esse comportamento. Polprasert et al (1992) e Costa et al (1997b) observaram elevadas quantias de microorganismos patogênicos.

## 2.7. Volume de lagoa por suíno

Ressalta-se que as lagoas para tratamento de dejetos de suínos, principalmente as anaeróbias, sempre trabalham sobrecarregadas, podendo gerar problema de odores. Conforme aumenta a capacidade da lagoa, o potencial de odor, a taxa de lodo e os organismos patogênicos diminuem, enquanto que a perda de nitrogênio aumenta (Barker, 1996). Assim, a questão é como determinar o volume ideal de lagoa por suíno.

Silva (1973), trabalhando com carga orgânica volumétrica de 0,05 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia e produção diária de DBO<sub>5</sub> entre 125 e 295 g/suíno com peso entre 45 e 115 kg, respectivamente, recomenda volume da lagoa entre 2,5 e 3,9 m<sup>3</sup>/suíno. Em 1993, Hermanson, através de pesquisas efetuadas nos Estados Unidos sobre o comportamento de *lagoas anaeróbias*, menciona que o volume da lagoa depende do número, do tamanho e da espécie dos animais, como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Volume mínimo recomendado para lagoas anaeróbias para vários tipos de animais domésticos e respectivos pesos.

| Tipo de Animal | Volume por kg de animal (m <sup>3</sup> /kg) | Volume por animal (m <sup>3</sup> /animal) | Peso do animal (kg) |
|----------------|--|--|---------------------|
| Frango         | 0,19   | 0,34                                       | 1,8                 |
| Porco          | 0,12   | 10,90                                      | 90,8                |
| Bovino         | 0,12   | 54,48                                      | 454,0               |
| Vaca           | 0,12   | 76,27                                      | 635,6               |

Fonte: Hermanson (1993)

Estudos recentes realizados por Barker (1996) na Carolina do Norte (EUA) indicam a temperatura como um fator fundamental para projetos de lagoas, uma vez que as atividades das bactérias aumentam com o aumento de temperatura. Assim as lagoas trabalham melhor em regiões sem inverno frio. A Tabela 2.5 fornece a capacidade da lagoa anaeróbia para tratamento de dejetos suínos na Carolina do Norte em função de sua categoria.

Tabela 2.5 - Volume mínimo recomendado para lagoas anaeróbias contendo dejetos de suínos na Carolina do Norte (EUA).

| Categoria animal                   | Pesomédio (kg) | Quantidade acumulada |                            | Volume da lagoa          |                         |                          |
|------------------------------------|----------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                                    |                | líquido (l/dia)      | lodo (m <sup>3</sup> /ano) | mínimo (m <sup>3</sup> ) | médio (m <sup>3</sup> ) | máximo (m <sup>3</sup> ) |
| Creche                             | 14             | 2,3                  | 0,0057                     | 0,8                      | 1,7                     | 2,6                      |
| Terminação                         | 61             | 10,2                 | 0,0284                     | 3,8                      | 7,7                     | 11,5                     |
| Porca + leitões em desmamentamento | 196            | 33,3                 | 0,0652                     | 12,3                     | 24,6                    | 36,9                     |
| Porca + suínos em crescimento      | 237            | 40,1                 | 0,0794                     | 14,8                     | 29,6                    | 44,4                     |
| Porcas + suínos em terminação      | 643            | 108,6                | 0,3262                     | 40,2                     | 80,4                    | 120,6                    |

Fonte: Barker (1996)

Como se verifica, há uma grande divergência entre os autores quanto aos volumes ocupados por animal e estes volumes são extremamente grandes comparados ao esgoto doméstico, o qual, conforme World Health Organization (1987), recomenda 0,5 m<sup>3</sup>/hab.

De outro modo, quando se deseja projetar *lagoas facultativas ou aeróbias*, recomenda-se o uso de carga orgânica superficial, em kg DBO/ha/dia. Neste caso, Barker (1996), estudando o comportamento de lagoas aeróbias na Carolina do Norte (EUA), elaborou a Tabela 2.6, a qual estabelece a área mínima para manter as condições aeróbicas em função da categoria do animal.

Tabela 2.6 - Área mínima recomendada para manter naturalmente as condições aeróbicas.

| Categoria animal                     | Peso médio do animal | Área superficial  |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------|
|                                      | (kg)                 | (m <sup>2</sup> ) |
| Leitão em desmamentamento            | 13,6                 | 7,4               |
| Suíno em terminação                  | 61,3                 | 32,6              |
| Porca com leitões em desmamentamento | 196,6                | 69,3              |
| Porca com suínos em desmamentamento  | 237,0                | 83,7              |
| Porca com suínos em terminação       | 643,3                | 340,5             |

Fonte: Barker (1996)

## 2.8. Fatores que influenciam o desempenho das lagoas de estabilização na remoção de matéria orgânica

As condições hidráulicas e biológicas das lagoas de estabilização podem ser afetadas por uma série de fatores. Alguns deles são em virtude do projeto e, outros, em função de sua natureza incontrollável. Portanto, devem, na medida do possível, ser criteriosamente considerados, a fim de serem minimizadas as suas interferências no funcionamento das lagoas (CETESB, 1990).

Nas lagoas de estabilização, a degradação envolve a participação de bactérias facultativas e estritamente anaeróbias, as quais transformam biologicamente a matéria orgânica em produtos finais mais estáveis. Vários autores têm notado uma perda na eficiência das lagoas durante o inverno, comparada com o verão. A temperatura tem influência significativa no comportamento do sistema de tratamento, pois afeta a velocidade de decomposição da matéria orgânica e está diretamente relacionada com o crescimento dos microorganismos (Merkel, 1981). Com ela abaixo de 5 °C, a fermentação do metano é dez vezes mais lenta do que a 35 °C (Oleszkiewicz e Koziarski, 1986), que é o ponto ótimo para bactéria mesofílica.

Segundo a CETESB (1990), a atividade biológica decresce à medida que a temperatura cai e, a grosso modo, pode-se prever uma redução da atividade microbiológica à metade para queda de 10 °C na temperatura. Para Noüe et al (1994), com a temperatura a 5 °C ou menos, o crescimento das algas e as atividades das bactérias são mínimas. Logo que ela começa a subir e permanece alta, as atividades das bactérias retornam, o que resulta no aumento de nitrificação dado pelos altos conteúdos de carbono e nitrogênio orgânico dos dejetos de suínos. Portanto, a temperatura é um fator importante na atividade metabólica das bactérias, a qual afeta a taxa de fermentação de resíduos orgânicos. Na Figura 2.1, elaborada por Merkel (1981), pode-se observar o efeito da temperatura na velocidade de redução dos sólidos voláteis às temperaturas de 20, 30 e 50°C.

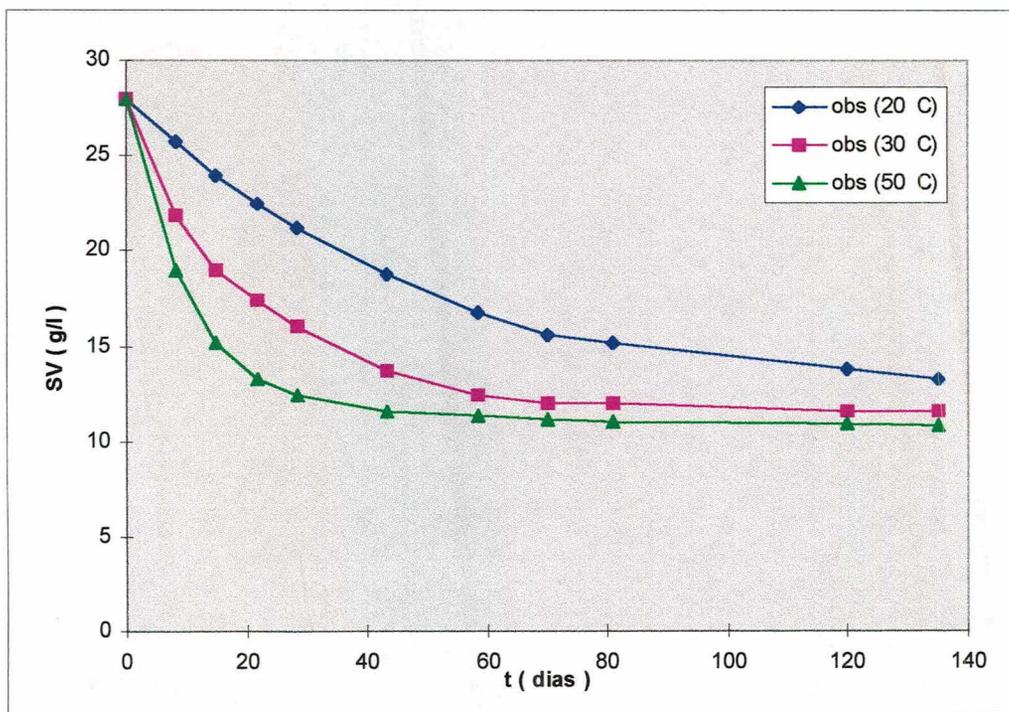


Fig. 2.1 - Efeito da temperatura na velocidade de redução dos sólidos voláteis às temperaturas de 20, 30 e 50 °C.

Fonte: Merkel (1981).

Outro fator que afeta o desempenho de uma lagoa na remoção da matéria orgânica é a concentração dos sólidos em suspensão (algas). Segundo Bradley (1983), o efeito das algas na concentração da DBO do efluente pode ser significativo. Estudos mostram que elas podem contribuir entre 50 e 60% da DBO no efluente da lagoa secundária e em torno de 11% da DBO no efluente da lagoa primária.

Para Curtis et al (1992a), as algas podem aumentar ou reduzir os efeitos da luz solar nas lagoas. Por um lado, elas aumentam as concentrações de oxigênio, e por outro, impedem a penetração da luz. Matheus et al (1989), estudando um modelo experimental de lagoa de estabilização fertilizada com dejetos de suínos, observaram que o excessivo desenvolvimento de algas proporciona acréscimo de sólidos orgânicos em suspensão, os quais são suscetíveis à oxidação química, o que aumenta substancialmente os valores da DQO. James (1987) comenta que essas algas podem contribuir com uma quantia significativa de sólidos suspensos no efluente. Para Arthur (1983), a concentração dos sólidos suspensos em efluentes de lagoas de estabilização é elevada, sendo portanto considerado como uma desvantagem do uso desse método de tratamento. Mara et al (1992) citado por Sousa (1994), argumentam que as algas quando lançadas no meio ambiente através dos efluentes das lagoas de estabilização são dispersas e nas horas iluminadas auxiliam na oxigenação do corpo receptor, podendo ser consumidas pelo zooplâncton e não exercendo uma DBO no mesmo.

## **2.9. Fatores que influenciam a remoção de nutrientes**

Os pesquisadores argumentam que existem numerosos fatores que influenciam a remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuárias. Picot et al, (1991 e 1993) estudaram a remoção destes nutrientes através de lagoas de alta taxa e notaram que durante o dia, com a radiação solar, há um crescimento na biomassa algal, a qual aumenta o oxigênio dissolvido, o pH e a alcalinidade total. Em consequência, ocorre a remoção de nutrientes pela absorção biológica, precipitação do fosfato e volatilização da amônia. Azov e Tregubova (1995) também notificaram o efeito da radiação solar sobre a nitrificação, uma vez que reduz a concentração da

amônia pela volatilização ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_3$ ), em virtude do alto pH. Além disso, registraram o valor do pH igual a 9 como sendo ótimo para a nitrificação.

O nitrogênio é um contribuinte significativo para a depleção do oxigênio. Quando se apresenta em abundância nos mananciais, favorece a rápida multiplicação da massa microbiana, causando a eutrofização dos mesmos. Em muitos casos, o nitrogênio pode tornar-se o nutriente limitante para o crescimento de algas nas lagoas de estabilização (Ferrara e Avci, 1982). Sua remoção em sistema de lagoas pode alcançar 80% ou mais e está relacionada com o pH, temperatura e tempo de detenção (Ferrara e Avci, 1982; Pano e Middlebrooks, 1982; Reed, 1985).

Pano e Middlebrooks (1982) argumentam a existência de três principais mecanismos na remoção de nitrogênio amoniacal nas lagoas:

- a) volatilização da amônia para a atmosfera;
- b) assimilação da amônia pela biomassa algal;
- c) nitrificação biológica acompanhada da desnitrificação.

A difusão da amônia para a atmosfera é a principal causa para sua remoção nas lagoas com pH acima de 9,5. Contudo, Ferrara e Avci (1982) usando uma série de equações concluíram que o principal processo para a remoção do nitrogênio não foi a volatilização da amônia, mas sim, a sedimentação do nitrogênio orgânico através da atividade biológica. De acordo com eles, o nitrogênio ocorre na forma inorgânica solúvel (amônia) e na forma orgânica em suspensão (biomassa), a qual sedimenta no fundo da lagoa, sendo uma parte degradada pela atividade das bactérias com produção de amônia, e a outra parte não biodegradável é incorporada ao lodo e permanece como resíduo. Pano e Middlebrooks (1982) registraram remoção da amônia maior que 90% em sistema de três lagoas, com a maioria ocorrendo nas lagoas facultativas primárias. Além disso, observaram que a remoção da amônia aumenta com o pH, temperatura e tempo de detenção. Contudo, com a temperatura acima de 20 °C, a remoção diminuiu ligeiramente, possivelmente devido à estratificação térmica e à falta de mistura nas lagoas.

## 2.10. Fatores que influenciam o desempenho das lagoas de estabilização na remoção de coliformes fecais

Diversos fatores controláveis e não controláveis influenciam para remoção de coliformes no tratamento de resíduos realizados em lagoas de estabilização. Nos processos facultativos são a carga orgânica, tempo de detenção e temperatura (Uhlmann et al, 1983), aliados a estes, outros fatores como profundidade das lagoas e radiação solar (McGarry e Pescod, 1970; Thirumurthi, 1974).

Polprasert et al (1983), através de pesquisas desenvolvidas com lagoas de estabilização, observaram que o decaimento bacteriano está relacionado com complexos fenômenos envolvendo aspectos ambientais e interações entre os microorganismos existentes nestas lagoas. Ao mesmo tempo, verificaram que a taxa de remoção ( $k_b$ ) de coliformes fecais diminui com o aumento da carga orgânica. Saqqar e Pescod (1992) confirmaram esse comportamento. Além disso, a taxa de remoção se elevou com o aumento de temperatura, radiação solar e pH.

James (1987) recomenda a manutenção de baixa concentração de matéria orgânica (DBO < 20 mg/l), pois a falta de alimento causa rapidez na mortalidade de coliformes fecais nas lagoas. Além disso, argumenta que a penetração da luz em lagoas de estabilização é limitada de 10 a 15 cm e, como as concentrações mais altas de bactérias raramente ocorrem na superfície, é improvável que a luz seja a responsável pela mortalidade das bactérias. Pearson et al (1987) observaram de modo diferente e comentaram que os números de coliformes fecais nem sempre são mais baixos na superfície onde as intensidades da luz são mais altas.

Pesquisas têm demonstrado que os principais fatores que afetam a taxa de remoção de bactérias patogênicas em lagoas de estabilização são a temperatura, o pH e a concentração de algas. Outros, como a penetração da radiação ultravioleta na coluna d' água (Moeller e Calkins, 1980), o elevado nível de oxigênio dissolvido e a liberação de toxinas pelas algas (Toms et al, 1975), também são citados como contribuintes para o processo de inativação dessas bactérias.

Em 1987, Pearson et al, em pesquisas desenvolvidas em lagoas de estabilização experimentais, observaram que os números de coliformes fecais são mais baixos onde o pH, a temperatura, o oxigênio dissolvido e a concentração de algas são mais altos. Os mesmos autores também realizaram estudos comparativos em lagoas de maturação. Uma lagoa com alta intensidade de luz e com baixo pH e oxigênio dissolvido tinha baixa remoção de coliformes fecais enquanto a outra, turva com alto pH e oxigênio dissolvido, tinha boa remoção desses organismos. Ao mesmo tempo, estudos em laboratório conduzidos pelos mesmos autores mostram que valores de pH de aproximadamente 9, ou acima, afetariam a mortalidade dos patógenos; ao passo que, a supersaturação dos níveis de oxigênio dissolvido pouco afetaria a destruição. Portanto, concluíram que o pH foi o principal responsável pela excelente remoção dos patógenos. Além disso, sustentam a idéia de que elevados valores de pH contribuem significativamente no aumento da mortalidade de coliformes fecais.

Curtis et al (1992b) mencionaram que o aumento de remoção que Pearson et al (1987) observaram nas lagoas não eram em razão apenas do alto pH, mas, sim, de uma parceria de luz solar, alto pH e alta concentração de oxigênio dissolvido.

Segundo Curtis et al (1994), a penetração da luz é de fundamental importância nas lagoas facultativa e de maturação em virtude da radiação ultravioleta afetar os sobreviventes patogênicos e a produtividade das algas pela absorção da luz. As algas, por sua vez, através do seu metabolismo, constituem a principal fonte de oxigênio para oxidação da matéria orgânica pelas bactérias (Azevedo Neto, 1985). Por outro lado, o efeito da luz na mortalidade das bactérias patogênicas é muito variável e depende do aumento da concentração do oxigênio dissolvido e de elevados valores de pH. Porém, segundo Azevedo Neto (1985), os raios solares vão se extinguindo à medida que penetram na massa líquida reduzindo a atividade fotossintética das algas e, por conseguinte, o teor do oxigênio dissolvido.

Pearson et al (1987) e James (1987) notaram que valores de pH em torno de 9 aceleram a destruição desses patógenos. Por outro lado, a produtividade das algas, por sua vez, pode ser definida por fatores ambientais e operacionais (Oron e Shelef, 1982). Os principais fatores ambientais envolvidos no processo são a radiação solar e a temperatura. Porém, tais parâmetros

são de difícil domínio, o que impede qualquer ação nesses fatores com respeito ao controle do processo, enquanto a profundidade da lagoa e o tempo de detenção são parâmetros operacionais que possibilitam a intervenção, permitindo a sua otimização.

Curtis et al (1992a) comentam que é difícil ver como a luz pode ter efeito direto em lagoas de estabilização de resíduos ricas em algas. Curtis (1990), citado por Curtis et al (1992b), estudou a influência das algas no processo de fotooxidação em dois modos opostos. Se por um lado, elas aumentaram a remoção de coliformes fecais ao fornecer alto pH e altas concentrações de oxigênio dissolvido, por outro, elas impediram a penetração da luz. Nesse sentido, os autores, Curtis et al (1992a), concluíram que existem duas possibilidades óbvias: o elevado pH ou diminui a resistência dos microorganismos pelo efeito da luz ou aumenta a produção de oxigênio de forma tóxica.

Pearson et al (1995) e Oragui et al (1995), trabalhando com lagoas facultativas e de maturação sob várias formas geométricas, argumentaram que a configuração das lagoas não tem influência na remoção de coliformes fecais. Contudo, von Sperling (1996b) contexta essa afirmação em razão de os autores adotarem o modelo de mistura completa, ao invés do modelo de fluxo disperso, que, a seu ver, seria de melhor aplicabilidade em virtude da ampla faixa de configurações geométricas, com relação comprimento/largura variando de 1/1 a 141/1.

## **2.11. Critérios e modelos de dimensionamento das lagoas**

Levantamentos baseados em projetos e sistemas em operação mostram a grande diversidade de critérios para dimensionamento das lagoas, criando uma série de dificuldades para a utilização desses sistemas (Kawai et al, 1981).

O dimensionamento de uma lagoa de estabilização para tratamento de águas residuárias baseia-se, essencialmente, na qualidade do resíduo a ser tratado e na concentração da DBO do afluente. Para Sanches et al (1994), a taxa de carga orgânica volumétrica é um parâmetro básico para projeto de digestores anaeróbios.

Para tratamento de águas residuárias fracas e médias (1.000 mg/l DBO<sub>5</sub>), uma simples lagoa anaeróbia normalmente é suficiente (Mara e Pearson, 1986). Ela é projetada com base na carga orgânica volumétrica expressa em g DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/d. Para águas residuárias fortes (1.000 < DBO<sub>5</sub> < 30.000 mg/l ou mais) é vantajoso o pré-tratamento em uma série de lagoas anaeróbias (McGarry e Pescod, 1970). De acordo com Costa et al (1995b e 1996), para tratamento de resíduos muito concentrados é necessária uma etapa preliminar para evitar assoreamento das lagoas. Vários sistemas têm sido propostos, dentre os quais o decantador de palhetas tem se destacado.

Numerosas técnicas têm sido apresentadas para modelar lagoas facultativas, as quais, segundo Finney e Middlebrooks (1980), são baseadas na carga orgânica e tempo de detenção, bem como em equações de projetos empírico e racional.

Os critérios e modelos empírico e racional para projeto de lagoas de estabilização são numerosos e bastante divulgados pelos especialistas da área, tais como: Vicent et al (1963), McGarry e Pescod (1970), Gloyna (1976), Wehner e Wilhelm (1956), Marais e Shaw (1961), Marais (1974), Mara (1975), Thirumurthi (1974), Arthur (1983), Oleszkiewicz e Koziarski (1986) e outros.

### **2.11.1. Modelos de remoção da matéria orgânica para projetos de lagoas**

#### **a) Lagoas anaeróbias**

Projetos de lagoas de estabilização anaeróbias são basicamente apoiados em critérios empíricos, desenvolvidos através de dados experimentais dos parâmetros como: carga orgânica volumétrica e/ou tempo de detenção (Saqqar e Pescod, 1995). Contudo, nenhum é ajustado em valor ótimo. De acordo com WHO (1987), todos os procedimentos para projetos de lagoas adotam um dos seguintes critérios:

- a) carga orgânica superficial (kg DBO<sub>5</sub>/ha/dia);
- b) tempo de retenção hidráulica (dia);
- c) carga orgânica volumétrica (kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia).

Porém, não é comum projetar lagoas anaeróbias seguindo o critério baseado na taxa de carga superficial.

Para Safley et al (1997), as lagoas para tratamento de resíduos orgânicos de animais devem ser projetadas para encontrar um critério de taxa de carga pré-determinada. A carga para as lagoas anaeróbias pode ser expressa como:

- a) carga de sólidos volumétrica (kg SV/m<sup>3</sup>/dia);
- b) carga orgânica volumétrica (kg DQO/m<sup>3</sup>/dia);
- c) peso vivo do animal por volume da lagoa (kg do animal/m<sup>3</sup>).

Vicent et al (1963) desenvolveram um modelo para projetos de lagoas anaeróbias em áreas tropicais para estimar a remoção da DBO. O modelo é empírico, baseado na teoria de mistura completa.

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{k_n \left(\frac{S_e}{S_o}\right)^n t + 1} \quad (2.4)$$

onde:

- $S_o$  é a concentração de DBO no afluente, em mg/l;
- $S_e$  é a concentração de DBO no efluente, em mg/l;
- $t$  é o tempo de detenção, em dias;
- $k_n$  é o coeficiente de remoção;
- $n$  é o expoente a ser determinado pelo experimento.

Ressalta-se que os valores de  $k_n$  e  $n$  variam de acordo com as características regionais do projeto. Em contrapartida, segundo Saqqar e Pescod (1995), esta fórmula tem pouco valor para projeto de lagoas porque apresenta várias limitações.

Em 1981, Oleszkiewicz avaliou reatores anaeróbios de resíduos e propôs um modelo para remoção da DBO, o qual tinha uma dependência exponencial da taxa de carga orgânica volumétrica com pseudo cinética de primeira ordem, tal que:

$$\frac{S_e}{S_o} = \exp(-k / L) \quad (2.5)$$

onde  $k$  é o coeficiente de remoção de primeira ordem, em  $g/l/d$  e,  $L$  é a carga orgânica volumétrica, em  $g/l/d$ .

Oleszkiewicz e Koziarski (1986) alertaram que os projetos existentes de lagoas anaeróbias necessitam de precisão, em razão do grande número de variáveis que afeta a performance da lagoa e que não é monitorado. Ainda no mesmo ano, os dois autores, trabalhando com lagoas anaeróbias, e somente Oleszkiewicz com lagoas aeradas, sugeriram que o desempenho de uma lagoa de estabilização deve ser interpretado como função da carga orgânica volumétrica e não como função do tempo de detenção.

Anos mais tarde, Venkataraman et al (1992) confirmaram esse procedimento e ainda comentaram que é extremamente difícil avaliar os parâmetros cinéticos para biomassa presente nas lagoas e, por isso, soluções empíricas e mecânicas sem muita precisão são usadas.

Oleszkiewicz e Koziarski (1986) concluíram que existem três estágios associados com a sedimentação nas lagoas anaeróbias. O primeiro, extremamente rápido, em torno de duas horas e remove aproximadamente 80% de SST, 55% de DQO e 35% de  $DBO_5$ . O segundo estágio, de rápida biodegradação, com cerca de três dias e remove 68% de DQO e 56% de  $DBO_5$ . O último estágio, de baixa biodegradação, ocorre depois de três dias.

Transformando a fórmula geral em uma série de expansão de McLaurin para remover o expoente, dado pela equação (2.5), tem-se:

$$\frac{S_e}{S_o} = \exp(-k/L) = 1 - \left(\frac{k}{L}\right) + \left(\frac{-k}{L}\right)^2 / 2! + \dots \quad (2.6)$$

Para pequenos valores de  $k/L$ , ou seja, grandes cargas e pequenos valores de  $k$ , pode ser resumido para:

$$\frac{S_e}{S_o} = 1 - \frac{k}{L} \quad \text{ou} \quad \frac{S_o - S_e}{S_o} = \frac{k}{L} \quad (2.7)$$

Portanto, para altas cargas, como são típicas de lagoas anaeróbias de dejetos de suínos, a curva revela várias taxas no processo. Neste caso, pode ser modelado como segue:

$$\frac{S_e}{S_o} = \exp(-k_1/L_1) + \exp(-k_2/L_2) + \exp(-k_3/L_3) \quad (2.8)$$

onde  $k_1, k_2, k_3$  são as taxas consecutivas para vários segmentos da curva e  $L_1 > L_2 > L_3$  são as cargas orgânicas volumétricas dos três estágios.

Segundo Sanches et al (1994), para avaliação dos modelos propostos por Oleskiewicz (1981) e por Oleskiewicz (1986), deveriam ser plotados os dados -  $\ln(S_e/S_o)$  com o inverso da carga orgânica volumétrica ( $1/L$ ). Uma boa correlação linear demonstraria a validade dos modelos e os valores dos coeficientes de remoção ( $k$ ) então seriam estimados. Os altos valores da correlação linear ( $R$ ) demonstraram a forte dependência da remoção da DBO solúvel com as taxas de carga orgânica volumétrica. Entretanto, o modelo de primeira ordem não ajustou bem os dados experimentais, e os autores argumentam que este procedimento poderia ser determinado pela influência de outros fatores relacionados com a taxa de carga orgânica volumétrica, tais como a concentração do afluente e o tempo de detenção hidráulica. Propuseram, então, um modelo de segunda ordem para remoção da DBO solúvel, o qual seria equacionado pela taxa de carga orgânica volumétrica e a concentração afluente, como segue:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{[1 + K_2 (\frac{S_o}{L})]} \quad (2.9)$$

onde  $K_2$  é o coeficiente de remoção de segunda ordem, em  $d^{-1}$ .

A equação acima pode ser linearizada pela expressão:

$$\frac{1}{S_e} - \frac{1}{S_o} = \frac{K_2}{L} \quad (2.10)$$

Neste caso, o modelo de segunda ordem ajustou os dados experimentais melhor do que o modelo de primeira ordem.

#### b) Lagoas facultativas

Em 1976, Gloyna propôs a seguinte equação empírica para projeto de lagoas de estabilização facultativas de águas residuárias:

$$V = 3,5 \times 10^{-5} Q L_a \theta^{(35-T)} f f' \quad (2.11)$$

onde:

$V$  é o volume da lagoa, em  $m^3$ ;

$Q$  é a vazão do afluente, em  $l/d$ ;

$L_a$  é a carga orgânica da DBO do afluente, em  $mg/l$ ;

$\theta$  é o coeficiente de temperatura;

$f$  é o fator de toxicidade de algas;

$f'$  é o fator de concentração de sulfatos,

$T$  é a temperatura média da água residuária do mês mais frio, em  $^{\circ}C$ .

Os estudos partiram de determinações experimentais, em laboratório, em que a eficiência de remoção da DBO foi da ordem de 80 a 90%, baseada em amostra não filtrada do afluente e

filtrada do efluente. De acordo com Gloyna, o fator de toxicidade de algas ( $f$ ) é igual a 1 para resíduos domésticos e para muitos resíduos industriais e o fator de concentração de sulfatos ( $f'$ ) também é 1, quando a concentração for menor que 500 mg  $\text{SO}_4/\text{l}$ .

Ressalta-se que a equação proposta por Gloyna, além de ser empírica, é tipicamente para o uso de esgoto doméstico, pois o autor trabalhou com tempo de detenção ótimo de 7 dias, a 35 °C, e uma concentração em termos de DBO de 200 mg/l.

Estudos realizados em 1970 sobre o comportamento de lagoas facultativas, por McGarry e Pescod, mostram as cargas superficiais máximas, em termos de DBO, que estas lagoas podem receber antes de se tornarem anaeróbias, a temperatura ambiente, pela equação:

$$L_s = 60,3 (1,099)^{T_a} \quad (2.12)$$

onde:

$L_s$  é a carga orgânica superficial da DBO do afluente, em Kg/ha/dia;

$T_a$  é a temperatura ambiente, em °C.

Entretanto, em 1975, Mara apresentou uma proposta de modificação da equação anterior. Anos mais tarde, Arthur (1983) sugere uma nova modificação incorporando um fator de segurança. Assim, a equação recomendada corretamente é:

$$L_s = 20 T_a - 60 \quad (2.13)$$

Em uma avaliação de lagoas facultativas existentes em regiões tropicais e temperadas, McGarry e Pescod (1970) verificaram que a remoção da DBO<sub>5</sub> pode ser estimada com cargas orgânicas superficiais variando de 30 a 500 kg/ha/dia, usando a seguinte equação empírica:

$$L_r = 10,75 + 0,725 L_o \quad (2.14)$$

onde:

$L_r$  é a DBO removida, em kg/ha/dia;

$L_o$  é a carga orgânica da DBO do afluente, em kg/ha/dia.

McGarry e Pescod mencionaram que sob condições de operação normal, o tempo de detenção hidráulica e a profundidade da lagoa apresentam pouca influência quanto à remoção superficial da DBO na lagoa facultativa primária.

Anos mais tarde, Mayo (1996) através de estudos realizados com lagoas facultativas, na Tanzânia, argumenta que a taxa de carga orgânica (DBO<sub>5</sub>) permissível é de 450 kg/ha/d. Porém, recomenda 400 kg/ha/d como fator de segurança. Além disso, comenta que a taxa de remoção da DBO<sub>5</sub> não é apenas dependente da carga da DBO<sub>5</sub>, mas também do tempo de detenção hidráulica, sendo, a seguinte equação proposta para prever a remoção da DBO<sub>5</sub>.

$$L_r = t (0,062L_o - 1,6) \quad (2.15)$$

Admite-se a existência de três tipos de regimes de fluxos hidráulicos:

- fluxo em pistão;
- mistura completa;
- fluxo disperso.

Enquanto os dois primeiros regimes: fluxo em pistão ou reator plug-flow ou ainda fluxo não disperso ( $\delta = 0$ ) e mistura completa ou fluxo completamente disperso ( $\delta = \infty$ ) descrevem condições de fluxo ideal, o último descreve condições de fluxo não ideal, tal que:

$$\text{Fluxo em pistão} \quad S_e = S_o \exp(-k t) \quad (2.16)$$

$$\text{Mistura completa} \quad \frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{(1+k t)} \quad (2.17)$$

Ressalta-se que de acordo com Hill (1980), não existe reator que seja verdadeiramente do tipo *fluxo em pistão* ou *mistura completa*. Por um lado, no reator do tipo pistão, cada partícula se desloca ao longo deste seqüencialmente, isto é, na mesma ordem que entrou. Assim, não

existindo mistura longitudinal e nem dispersa nesse sentido. Conseqüentemente, o tempo de percurso dessa partícula é igual ao tempo de detenção teórico. Por outro, no reator de mistura completa, as partículas ao entrarem no mesmo são imediatamente dispersas em todo corpo do reator e se deslocam ao longo deste de forma randômica. De acordo com Dorego e Leduc (1996), na abordagem tradicional em relação à avaliação de projetos e desempenho de lagoas tem sido admitida a ocorrência dos regimes de mistura completa ou fluxo pistão, dependendo das configurações geométricas das lagoas. Contudo, nenhum desses dois fluxos extremos é realmente encontrado na prática. Von Sperling (1996a) argumenta que a remoção da DBO processa-se segundo uma reação de primeira ordem, na qual a taxa de reação é diretamente proporcional à concentração do substrato, e, nestas condições, o regime hidráulico da lagoa tem grande influência na eficiência do tratamento.

O valor do coeficiente  $k$  pode ser obtido através de experiências em laboratório ou em campo nas próprias lagoas, em função do modelo hidráulico admitido. Este fato deve ser considerado quando da seleção do valor a ser adotado para projeto de uma nova lagoa. É importante que se registre a temperatura e as relações geométricas das lagoas, além do modelo hidráulico adotado.

Thirumurthi (1969) recomendou o emprego da equação de reatores com fluxo disperso, desenvolvida por Wehner e Wilhelm (1956), na qual ocorre a degradação da matéria orgânica, no regime cinético de primeira ordem, pelas bactérias nas lagoas facultativas:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4 a \exp(1/2 \delta)}{(1+a)^2 \exp(a/2 \delta) - (1-a)^2 \exp(-a/2 \delta)} \quad (2.18)$$

Após o sinal de igualdade, o segundo termo do denominador da equação (2.18) é pequeno e, como aproximação, pode ser desprezado. A equação simplificada torna-se:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{4 a \exp(1-a)/2 \delta}{(1+a)^2} \quad (2.19)$$

na qual:

$$a = \sqrt{1 + 4 k t \delta} \quad \text{e} \quad \delta = \frac{c}{v d}$$

onde:

$\delta$  é o número de dispersão da lagoa ( $0 < \delta < \infty$ );

$c$  é o coeficiente de dispersão, em  $\text{m}^2/\text{h}$ ;

$v$  é a velocidade média de deslocamento, em  $\text{m}/\text{h}$ ;

$d$  é o valor do deslocamento médio de uma partícula típica no reator, em  $\text{m}$ ;

$t$  é o tempo de detenção hidráulico, em dia;

$k$  é a taxa de remoção de primeira ordem, em  $\text{d}^{-1}$ ;

$\exp$  é a base natural de logaritmos, 2,71829.

O uso de modelos de fluxo disperso aparece como uma melhor aproximação para o projeto de lagoas de estabilização. No entanto, a principal dificuldade no uso desses modelos é a determinação do número de dispersão (Mara e Pearson, 1986). Para facilitar seu emprego Thirumurthi elaborou a Figura 2.2, que avalia a eficiência de remoção da DBO, relacionando o valor do produto  $k.t$  na ordenada com o grau de dispersão  $\delta = c/v.d$ , obtendo na abscissa a eficiência de remoção e a fração remanescente da DBO.

Agunwamba et al (1992) desenvolveram uma fórmula para determinação do número de dispersão de fluxo disperso, porém, muito complexa. Em 1993, Yanez apresentou uma fórmula que estima o número de dispersão de fluxo disperso. Esta de grande simplicidade, já que depende apenas da relação comprimento/largura, isto é:

$$\delta = \frac{C / L}{-0,261 + 0,254 (C / L) + 1,014 (C / L)^2} \quad (2.20)$$

onde:

$\delta$  é o número de dispersão da lagoa, adimensional;

$C$  é o comprimento da lagoa, em  $\text{m}$ ;

$L$  é a largura da lagoa, em  $\text{m}$ .

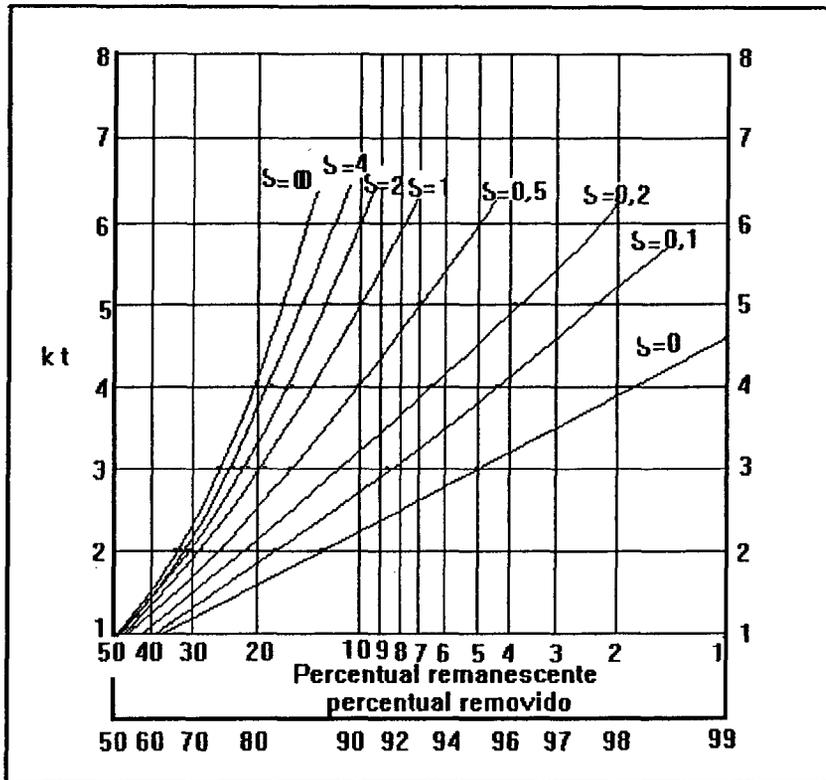


Fig. 2.2 - Eficiência de remoção da DBO.

Fonte: Thirumurthi (1969).

As comparações efetuadas por von Sperling (1996a), indicaram que a fórmula de Yanez conduz a resultados próximos aos alcançados por fórmulas mais sofisticadas, como a de Agunwamba et al (1992).

Marais e Shaw (1961) desenvolveram um modelo de lagoas de estabilização admitindo que elas funcionam como um reator de mistura completa e que a remoção da DBO segue uma cinética de primeira ordem. Porém, a constante de degradação é dependente da temperatura. Essa dependência é expressa por:

$$k_T = k_{T_0} \theta^{(T-T_0)} \quad (2.21)$$

onde:

$k_T$  é o valor de  $k$  na temperatura  $T$ , em  $d^{-1}$ ;

$k_{T_0}$  é o valor de  $k$  na temperatura de referência  $T_0$ , em  $d^{-1}$ ;

$\theta$  é o coeficiente de reação da temperatura.

Assim, a equação (2.17) pode ser escrita como:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{(1 + k_t t)} \quad (2.22)$$

Contrariamente, Thirumurthi (1974) afirma que lagoas de estabilização facultativas não podem ser projetadas racionalmente, admitindo que elas funcionam como regime de mistura completa ou fluxo pistão, uma vez que elas exibem fluxo padrão não ideal e recomenda o uso da equação (2.18) para projeto dessas lagoas. Para Finney e Middlebrooks (1980), nenhum desses modelos para projetos de lagoas facultativas funcionam adequadamente. Poucas pesquisas têm sido feitas para determinar fatores que influenciam o tempo de residência hidráulica.

Suwannakan, citado por Silva e Mara (1979), pesquisou uma série de lagoas, usando o modelo reduzido em laboratório, tendo como efluente águas residuárias artificiais com leite sintético. Marais e Shaw analisaram os resultados obtidos e encontraram  $k_{35} = 1,2 d^{-1}$  e  $\theta = 1,085$ . Logo, a equação (2.21) passa a ter a seguinte notação:

$$k_T = 1,2 (1,085)^{T-35} \quad (2.23)$$

Mara (1975) recomenda que a equação adequada para o esgoto doméstico no Quênia seja:

$$k_T = 0,30 (1,05)^{T-20} \quad (2.24)$$

Outros pesquisadores têm encontrado o valor de  $k$  dependente de outros parâmetros. Por exemplo, Saqqar e Pescod (1992) descobriram que a taxa de remoção aumenta com a temperatura, pH e radiação solar.

Considerando-se um conjunto de lagoas de estabilização em série com tamanhos desiguais e condições de mistura completa, a equação (2.17) passa a ser:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{(1 + k_1 t_1)(1 + k_2 t_2) \cdots (1 + k_n t_n)} \quad (2.25)$$

onde  $k_1, k_2, \dots, k_n$  são os coeficientes de remoção da DBO para lagoas 1, 2, ..., n, os quais são computados separadamente para cada célula.

Considerando-se, agora, lagoas de mesmo volume e, portanto, mesmo tempo de detenção, e k permanecendo constante, pode-se reescrever a equação como:

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{1}{[1 + k (\frac{t}{n})]^n} \quad (2.26)$$

na qual:

k é a constante de reação, em  $d^{-1}$ ;

n é o número de lagoas, todas de igual volume.

Para se projetar uma lagoa de estabilização facultativa é necessário calcular seu volume, ou tempo de detenção, como uma função das condições ambientais, taxa de carga orgânica e eficiência de remoção (Colomer e Rico, 1993), e, até o presente momento, um método de projeto para aplicação geral não existe. Três abordagens são usadas baseadas em modelos empíricos, semi-empíricos e mecânicos. Estas abordagens têm suas vantagens e desvantagens. Os modelos empíricos e semi-empíricos são mais simples, mas não permitem extrapolação para a prática de projetos em todos os locais e condições ambientais. Por outro lado, os modelos mecanísticos são os mais racionais. Porém, sua aplicação é matematicamente complexa. Moreno et al (1988) afirmam que a maioria dos modelos que descrevem complicados mecanismos pelos processos de biodegradação falham.

### 2.11.2. Modelos de remoção de nitrogênio para projetos de lagoas

A estimativa da qualidade em termos de Nitrogênio tem sido estudada por vários autores. Pano e Middlebrooks (1982) desenvolveram dois modelos de remoção do *Nitrogênio amoniacal* como função da temperatura, pH e tempo de detenção hidráulica. Eles admitiram a cinética de remoção de primeira ordem e mistura completa nas lagoas. O primeiro modelo refere-se à variação de temperatura entre 1 e 20 °C, tal que:

$$\frac{N_{h_e}}{N_{h_o}} = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{A}{Q}\right)(0,0083 + 0,000134 T) \exp[(1,041 + 0,044)(pH - 6,6)]\right\}} \quad (2.27)$$

onde:

$N_{h_e}$  é a concentração do nitrogênio amoniacal do efluente, em mg/l;

$N_{h_o}$  é a concentração do nitrogênio amoniacal do afluente, em mg/l;

$A$  é a área superficial da lagoa, em m<sup>2</sup>;

$Q$  é a vazão da lagoa, em m<sup>3</sup>/dia;

$T$  é a temperatura da lagoa, em °C.

O segundo modelo se aplica com a temperatura variando entre 21 e 25 °C. Assim, a equação fica:

$$\frac{N_{h_e}}{N_{h_o}} = \frac{1}{\left\{1 + \left(\frac{A}{Q}\right)(5,035 \times 10^{-3}) \exp[1,540(pH - 6,6)]\right\}} \quad (2.28)$$

Em 1985, Reed argumenta que os principais fatores que afetam a remoção do Nitrogênio total são: pH, temperatura e tempo de detenção. Registrou, ainda, que tanto a volatilização da amônia como a sedimentação no fundo da lagoa, ou ambos, podem ser responsáveis pela remoção da amônia, dependendo das condições ambientais. Porém, a volatilização da amônia para a atmosfera pode ser o mecanismo mais importante em uma larga escala de tempo. Neste

mesmo ano, Reed desenvolveu um modelo de remoção do *Nitrogênio total* em uma série de lagoas, como função da temperatura, pH e tempo de detenção. O autor usou a cinética de remoção de primeira ordem e regime de fluxo em pistão e obteve a seguinte equação:

$$Nt_e = Nt_o \exp \{ -k_T [ t + 60,6 ( pH - 6,6 ) ] \} \quad (2.29)$$

onde:

$$k_T = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (2.30)$$

na qual:

$$k_{20} = 0,0064 \text{ d}^{-1} \text{ e } \theta = 1,039$$

Assim, a equação pode ser escrita como uma combinação das equações (2.29) e (2.30), isto é,

$$Nt_e = Nt_o \exp \{ -[ k (1,039)^{T-20} ] [ t + 60,6 ( pH - 6,6 ) ] \} \quad (2.31)$$

onde:

$Nt_e$  é a concentração do nitrogênio total do efluente, em mg/l;

$Nt_o$  é a concentração do nitrogênio total do afluente, em mg/l;

$k$  é a constante de remoção de primeira ordem, em  $\text{d}^{-1}$ ;

$t$  é o tempo médio de detenção hidráulico, em dia;

$T$  é a temperatura média na lagoa, em  $^{\circ}\text{C}$ .

O valor da constante de degradação ( $k$ ) de primeira ordem é dependente da temperatura, do tempo de detenção e do pH.

A equação (2.31) foi usada para prever valores do efluente em 13 lagoas de estabilização de resíduos com razoável exatidão sobre uma ampla variação de carga orgânica, temperatura e pH.

Segundo Charles et al (1995), os resultados obtidos na aplicação de ambos os modelos desenvolvidos por Pano e Middlebrooks (1982) e Reed (1985), na remoção do nitrogênio amoniacal e nitrogênio total, respectivamente, ao sistema piloto de lagoas de estabilização localizado no Campus da Universidade de Zulia, na Venezuela, foram significativamente diferentes dos valores experimentais, o que leva à necessidade de se adaptar o modelo às condições da própria região.

Para Muttamara e Puetpaiboon (1995), outro fator que ajuda na perda do nitrogênio são as divisórias nas lagoas, uma vez que provocam um regime próximo ao fluxo em pistão, o qual aumentará a eficiência de remoção do carbono orgânico e do nitrogênio. Contrariamente, para Silva et al (1995), o uso de chicanas nas lagoas de maturação não aumenta a remoção de nitrogênio, no entanto a redução do nitrogênio e da amônia é favorecida com o número de lagoas em série.

### 2.11.3. Modelos de remoção de microorganismos patogênicos para projetos de lagoas

O projeto de lagoas facultativas ou de maturação é baseado nas equações para o decaimento de bactérias fecais, admitindo mortalidade de primeira ordem e condições de mistura completa através da lagoa. Assim, a versão apropriada da equação (2.17) passa a ser do tipo:

$$\frac{N_e}{N_o} = \frac{1}{(1 + k_b t)} \quad (2.32)$$

na qual:

$N_o$  é o número de CF/100 ml do afluente;

$N_e$  é o número de CF/100 ml do efluente;

$k_b$  é a constante de mortalidade de CF, em  $d^{-1}$ ;

$t$  é o tempo de detenção, em dias.

A constante de primeira ordem de mortandade de coliformes fecais  $k_b$ , é dependente da temperatura e é estimada com base na função de Arrhenius ou van't Hoff e definida por:

$$k_{bT} = k_{20} \theta^{(T - 20)} \quad (2.33)$$

onde:

$k_{bT}$  é a constante de mortandade de CF a temperatura T, em  $d^{-1}$ ;

$k_{20}$  é a constante de mortandade de CF a 20 °C, em  $d^{-1}$ ;

$\theta$  é o coeficiente de reação de temperatura;

T é a temperatura média do mês mais frio, em °C.

O valor de  $k_b$  é sensível à variação de temperatura, contudo, deve-se notar que diferentes valores de  $\theta$  são propostos na literatura. Marais (1974) registrou 1,19 para o valor de  $\theta$  e, 2,6  $d^{-1}$  para  $k_{20}$ . Assim, a equação (2.33) toma a seguinte notação:

$$k_{20} = 2,6 (1,19)^{T - 20} \quad (2.34)$$

Segundo Yanez (1993), citado por von Sperling (1996a), o valor de 2,6  $d^{-1}$  para  $K_{20}$  é o mais elevado dos registrados para lagoas de maturação, que varia de 0,5 a 2,6  $d^{-1}$ . Ademais, há evidências de que os valores sejam menores, e mais próximos de 1,0  $d^{-1}$ . Os valores de  $\theta$  também variam, segundo a literatura. Para Yanez, o valor de  $\theta = 1,19$  registrado por Marais é superestimado, e os valores de  $\theta$  devem estar próximos de 1,07.

Marais (1974), em estudos realizados em tanques sépticos em Lusaka na África do Sul, concluiu que a taxa de mortalidade de bactérias patogênicas em condições anaeróbias é bastante reduzida, constituindo-se o oxigênio dissolvido, presente na lagoa de estabilização, um fator importante para destruição de bactérias.

Tradicionalmente, a configuração mais adequada de um sistema de lagoas de estabilização em série, para remoção de matéria orgânica e bactérias patogênicas, constitui-se de uma anaeróbia,

seguida de uma facultativa e uma ou mais lagoas de maturação, o que vai depender do tamanho do sistema, bem como da qualidade do efluente desejado.

Dessa forma, no que diz respeito à qualidade bacteriológica do efluente, Silva e Mara (1979) apontam o grau de tratamento desejado que irá determinar o número de lagoas de maturação necessário na série, com base na equação a seguir:

$$\frac{N_e}{N_o} = \frac{1}{(1 + k_b t)_{ana} (1 + k_b t)_{fac} (1 + k_b t_1)_{mat.1} (1 + k_b t_2)_{mat.2} \cdots (1 + k_b t_n)_{mat.n}} \quad (2.35)$$

Porém, este modelo assume que o valor de  $k$  seja igual para todas as lagoas na série e, conseqüentemente, que as taxas de mortandade de CF são as mesmas em cada lagoa para um dado sistema.

Para se ter um efluente de qualidade de bactérias fecais aceitável, reduções da ordem de 99,99-99,999% são necessárias, e dados experimentais indicam que reduções desta ordem são inatingíveis em uma única lagoa, em virtude do tempo de detenção necessário ser tão grande que a altura da água não se manteria devido à evaporação e infiltração. Contudo, tais reduções podem ser alcançadas com lagoas operando em série (Marais, 1974). O autor ressalta que o volume total de um sistema de lagoas em série pode ser reduzido de 10 a 100 vezes comparado com uma única lagoa e ainda produzir a mesma qualidade bacteriológica no efluente.

Lagoas operando em série deveriam ter diferentes taxas de reação em razão de dependerem dos vários fatores físico-químico e biológico que existem em cada uma (Polprasert e Bhattacharai, 1985). Porém, isto contraria a maioria dos modelos. Pearson et al (1987) comentam que as primeiras lagoas em uma série são designadas para remoção da DBO, enquanto que as lagoas de maturação subseqüentes são para a remoção de patógenos.

## 2.12. Lagoas de estabilização em série

Lagoas podem ser usadas isoladas ou em combinação com outros processos de tratamento de águas residuárias (Middlebrooks, 1987). Trabalhando em série é possível alcançar um tratamento mais eficiente do que o obtido em modelo clássico (Noûe et al, 1994).

Marais (1974) observou que o melhor efluente é obtido de um sistema de pequenas lagoas em série do que de uma única lagoa, com mesma área, tempo de detenção e carga orgânica. Porém, isto é válido para sistema de lagoas de maturação. Em 1975, Mara endossou esse procedimento, visto que o funcionamento hidráulico desse tipo se assemelha a um reator fluxo em pistão, ou seja, reator de mistura não dispersa, que é comprovadamente de eficiência superior a um de mistura totalmente dispersa. A eficiência de um sistema de lagoas em série aumenta com o número das lagoas, principalmente se conseguirem tempos de detenção iguais em cada unidade. Em 1979, Silva e Mara comprovaram esse comportamento através da demonstração do *teorema de Marais*. Todavia, Lima (1984) alerta que o teorema de Marais não se confirma na prática, uma vez que a sua demonstração se baseia na constância do valor de  $k$  ao longo das lagoas de iguais dimensões, em série.

Em 1993, Yang et al pesquisaram dois tipos de processos para tratamento de dejetos suínos: lagoas em série e lagoa simples. Para o sistema de lagoas em série foram instalados cinco reatores com volume total de 540 litros (108 litros cada reator) e com tempo de detenção total de 13,5 dias. Para a lagoa simples foi instalado um reator com capacidade de 400 litros e com tempo de detenção de 14 dias. As concentrações afluentes (DQOt, DQOs, SST e NTK) eram similares, no entanto, o desempenho baseado na eficiência de remoção do sistema de lagoas simples, foi inferior ao sistema de lagoas em série. Os autores argumentam que isto pode ser devido a curto circuito existente no fluxo do sistema de lagoas simples e à falta de população de bactérias necessária no sistema de lagoa única, principalmente para a baixa eficiência de remoção do NTK no sistema dessa lagoa se comparado com o sistema de lagoas em série. Comentam ainda que a população de bactérias necessária para o processo de nitrificação e desnitrificação não é propriamente desenvolvida em sistema de uma única lagoa.

Em pesquisas realizadas na Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários - EXTRABES, Campina Grande, Paraíba, Oliveira (1990) encontrou valores médios para a constante de degradação  $k_b$  igual a  $0,081 \text{ d}^{-1}$  e  $1,06 \text{ d}^{-1}$ , respectivamente para um sistema de lagoas em série (uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação), com tempo de detenção hidráulica total de 25 e 40 dias, obtendo remoção total de 99,975% e 99,999%, respectivamente. Neste estudo foi admitido o regime de mistura completa e a cinética de primeira ordem para remoção de coliformes fecais.

De acordo com Curtis et al (1992b), os mecanismos fundamentais de remoção de coliformes fecais em lagoas de estabilização ainda não estão claros, necessitando de um modelo matemático que possa extrair todos os fatores juntos para habilitar engenheiros na escolha de projetos mais econômicos. Curtis et al (1994) argumentaram que o estudo da penetração da luz nestas lagoas é o primeiro passo essencial na modelagem destes processos.

### **2.13. Conclusão do capítulo**

Após a realização da pesquisa bibliográfica de vários artigos, de autores brasileiros e estrangeiros, para verificação do que já existe no tocante a técnicas de modelagem de lagoas de estabilização de águas residuárias (esgoto doméstico, efluentes industriais e dejetos de suínos), nota-se a importância de cada um deles em seus referidos assuntos. No entanto, a maioria das lagoas de estabilização apresentada pelos autores foi dimensionada de forma empírica, razão pela qual a modelagem de lagoas varia de local para local, de região para região e, principalmente, de país para país.

## CAPÍTULO 3

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Considerações iniciais

Através do levantamento bibliográfico realizado, constatou-se a existência de diversos critérios na modelagem de lagoas de estabilização, com elevado grau de empirismo e de aplicação regional. Foram apresentados alguns, dos quais se achou de maior interesse ou de melhor aplicabilidade prática. Porém, cabe ressaltar que nenhum se apresenta efetivamente conclusivo de forma que cubra todos os requisitos técnicos inerentes ao desempenho de lagoas, principalmente quando se trata de dejetos suínos.

Dessa forma, a questão é: quais desses modelos apresentam melhor aplicabilidade para o universo do estudo?

A solução exige pesquisas detalhadas para a obtenção de parâmetros reais de funcionamento das lagoas de estabilização, em diversas condições e diferentes fatores climatológicos. Portanto, para a realização da pesquisa foi construído um sistema de tratamento de dejetos suínos na Unidade Experimental (UNETDS) do Centro Nacional de Pesquisas de Suínos e Aves - CNPSA da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias - EMBRAPA, localizado em Concórdia/SC, Brasil. Constituído de um equalizador, um decantador de palhetas e quatro lagoas de estabilização, em escala real, dispostas em série, sendo as duas primeiras anaeróbias e idênticas, seguidas de uma facultativa e uma de aguapés. Além deste sistema, também foi utilizado o sistema de tratamento da Cooperativa Central Oeste de Santa Catarina - COOPERCENTRAL AURORA - Chapecó/SC. Composto de um equalizador, uma peneira vibratória para separação de sólidos-líquidos e seis lagoas de estabilização, em escala real, em série, sendo as duas primeiras anaeróbias, seguidas de uma aerada, duas facultativas e a última de maturação ou polimento.

### **3.2. Unidade experimental de tratamento de dejetos suínos - UNETDS**

O presente trabalho foi realizado na Unidade Experimental de Tratamento de Dejetos Suínos (UNETDS), do Centro Nacional de Pesquisas de Suínos e Aves - CNPSA, da Empresa Brasileira Agropecuária - EMBRAPA, localizado na vila Tamanduá, no município de Concórdia.

A cidade de Concórdia, por sua vez, está situada na Região Oeste do Estado de Santa Catarina, na latitude de 27°14'03" e longitude de 52°01'40", distante a 556 km da capital do Estado, Florianópolis, com uma altitude de 568 m acima do nível do mar.

#### **3.2.1. Descrição do sistema experimental - CNPSA/EMBRAPA**

O sistema de lagoas em escala real pertence à unidade experimental de tratamento de dejetos suínos do CNPSA/EMBRAPA. As lagoas anaeróbias e facultativa foram projetadas em função dos resultados obtidos com lagoas de estabilização em escala real, e funcionamento contínuo do CNPSA e da COOPERCENTRAL (Costa et al 1995a, 1995b e Oliveira 1995), enquanto que a lagoa de aguapés foi projetada baseada nos resultados obtidos com as lagoas em escala piloto, e funcionamento em batelada (Bavaresco et al, 1996).

As lagoas do CNPSA/EMBRAPA foram construídas com a utilização de retro-escavadeira da própria Empresa, para movimento de terra, bem como de trabalhadores para acabamentos finais, como: nivelamento de fundo e acerto dos taludes interno e externamente. As lagoas foram revestidas com vinimanta de PVC flexível doada pela SANSUY e montadas pela IRRIGATER (Irrigação e Meio Ambiente), com sede em Chapecó/SC.

O sistema experimental consiste de um equalizador, seguido por um decantador de palhetas (DP) ou de fluxo ascendente, duas lagoas anaeróbias (LA1) e (LA2), uma lagoa facultativa (LF) e uma lagoa de aguapés (LAG). As lagoas são retangulares, sendo suas áreas superficiais no topo maiores do que no fundo, e estão ligadas em série. Cada lagoa anaeróbia apresenta

uma relação entre comprimento e largura de 11,3 m x 7,4 m, na parte superior. Essa relação para a lagoa facultativa é de 16,5 m x 6,4 m, e para a lagoa de aguapés é de 25,0 m x 4,0 m. A Figura 3.1 apresenta um esquema do sistema experimental utilizado no trabalho, e a Tabela 3.1 apresenta as características físicas das lagoas.

O equalizador foi conectado ao decantador e este, por sua vez, interligado à primeira lagoa anaeróbia LA1 por meio de tubos de PVC de 75 mm de diâmetro. As interligações das outras lagoas também foram feitas com tubos de PVC de 75 mm de diâmetro. Em cada entrada das lagoas anaeróbias LA1, LA2 foi colocada uma conexão em “T”, de PVC, com a mesma medida. Nesta, três pedaços de tubos foram ligados, dividindo a taxa de fluxo em três partes, os quais emergiam nas lagoas anaeróbias em torno de 80 cm abaixo da superfície da água. A entrada das lagoas facultativa LF e de aguapés LAG era feita através de duas unidades e estas emergiam nas mesmas cerca de 40 cm abaixo da coluna d’água. A saída de cada lagoa era única e situava-se a 30 cm abaixo da superfície da água.

O equalizador de alvenaria possui volume de 6 m<sup>3</sup>, cujas funções são de armazenar os dejetos provenientes de granjas de suínos, e promover uma homogeneização do líquido que alimenta o sistema de tratamento.

O processo adotado para o tratamento primário foi o decantador de palhetas. Este, por sua vez, contém divisórias de alvenaria para alteração do fluxo líquido e uma superfície de 5,65 m<sup>2</sup>. Dimensionado pelo modelo proposto por Weller & Williers, avaliado por Costa et al (1995a), tem as seguintes medidas: 4,35 m de comprimento; 1,30 m de largura; 1,30 m de profundidade máxima e 0,40 m de profundidade mínima. Possui três divisórias internas e uma caixa para equalização do líquido na saída. Suas funções são de diminuir a carga orgânica na fração líquida dos dejetos e concentração da fração sólida para sua utilização como fertilizante do solo, além de evitar o assoreamento das lagoas.

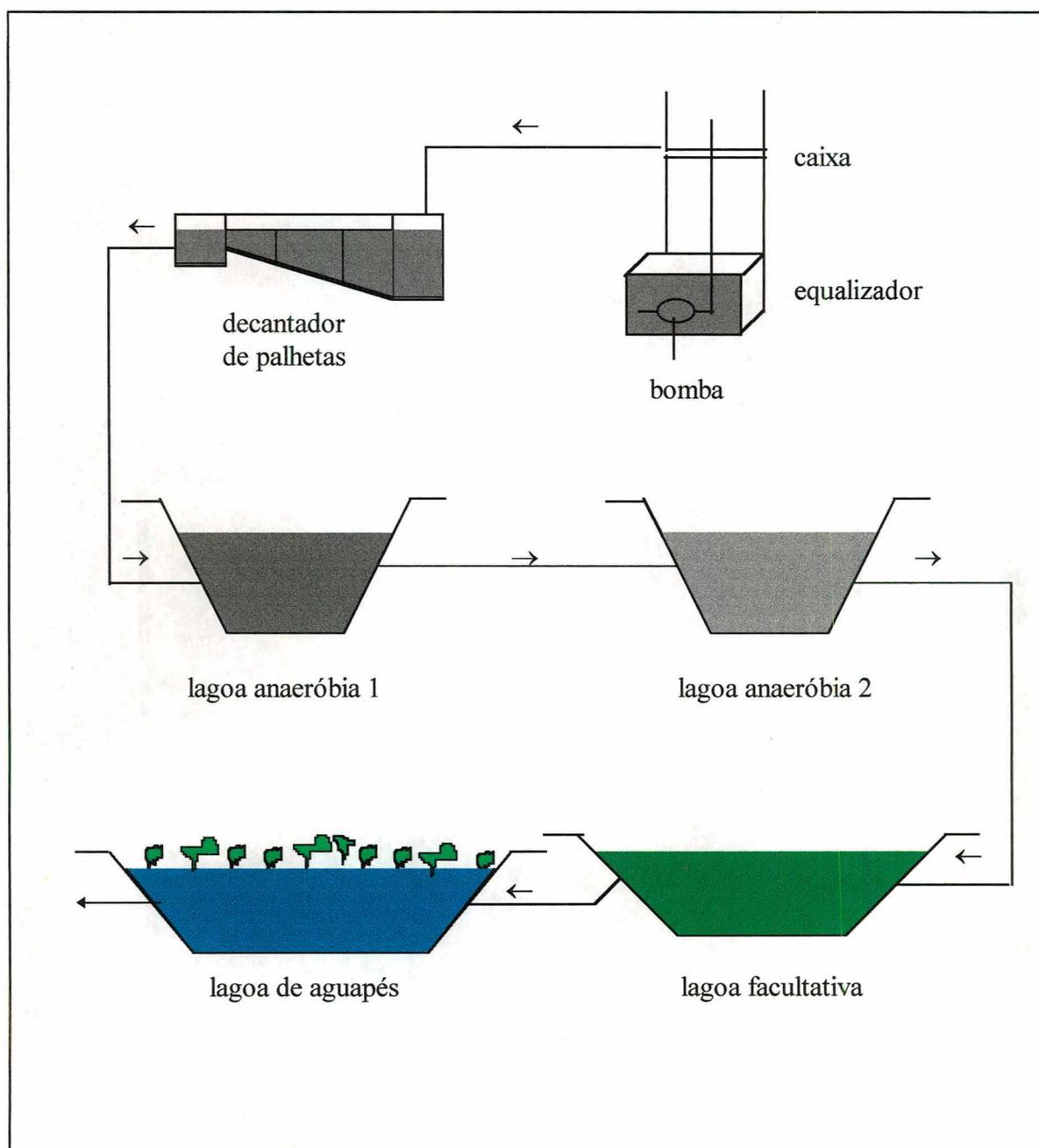


Fig. 3.1 - Sistema de tratamento de dejetos de suínos da Unidade Experimental UNETDS do CNPSA/EMBRAPA.

Tabela 3.1 - Características físicas das lagoas do sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA.

| DIMENSÕES                          | L A G O A S |        |        |        |
|------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                                    | LA1         | LA2    | LF     | LAG    |
| Comprimento topo (m)               | 11,30       | 11,30  | 16,50  | 25,00  |
| Comprimento fundo (m)              | 8,90        | 8,90   | 14,70  | 21,00  |
| Largura topo (m)                   | 7,40        | 7,40   | 6,40   | 4,00   |
| Largura fundo (m)                  | 5,00        | 5,00   | 4,60   | 2,00   |
| Superfície topo (m <sup>2</sup> )  | 83,62       | 83,62  | 105,60 | 100,00 |
| Superfície fundo (m <sup>2</sup> ) | 44,50       | 44,50  | 67,60  | 46,00  |
| Profundidade (m)                   | 1,70        | 2,20   | 0,85   | 0,80   |
| Volume (m <sup>3</sup> )           | 106,40      | 137,70 | 73,00  | 58,00  |

### 3.2.2. Alimentação do sistema e carga das lagoas

O sistema de tratamento era alimentado diariamente, pela manhã e/ou tarde. Os dejetos das instalações suínolas do sistema de produção de suínos (SPS) do CNPSA eram succionados por uma bomba acoplada a um trator tanque do tipo pipa, com 4 m<sup>3</sup> de capacidade, e transportados até o equalizador da unidade experimental (UNETDS). Daí, através do acionamento de uma bomba peristáltica, submersa, fazia-se a homogeneização dos mesmos e eram conduzidos ao decantador, com uma taxa de fluxo constante de aproximadamente 20 l/min, até completar o volume de 3,25 m<sup>3</sup>. Estes resíduos orgânicos, com a mesma taxa de fluxo, eram dirigidos do decantador à lagoa anaeróbia LA1, por gravidade, e conseqüentemente para as demais lagoas, já que o sistema era em série. As Figuras 3.2 e 3.3 apresentam uma vista das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, e as Figuras 3.4 e 3.5 mostram as lagoas facultativa LF e de aguapés LAG. Os sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica retidos no decantador (aproximadamente 1/4 m<sup>3</sup>) eram retirados todos os dias e destinados à compostagem.



Fig. 3.2 - Vista da lagoa anaeróbia LA1 do sistema experimental do CNPSA



Fig. 3.3 - Vista da lagoa anaeróbia LA2 do sistema experimental do CNPSA



Fig. 3.4 - Vista da lagoa facultativa LF do sistema experimental do CNPSA



Fig. 3.5 - Vista da lagoa de aguapés LAG do sistema experimental do CNPSA

**Importante:**

O sistema entrou em operação em dezembro de 1995 e foi encerrado no mês de agosto de 1997. Uma vez que as lagoas foram dispostas em série, cada uma teve seu início de operação diferenciado, isto é, a lagoa LA1 começou a funcionar em dezembro/95, a lagoa LA2 em janeiro/96, a lagoa LF em fevereiro/96 e a lagoa LAG foi construída mais tarde, iniciando a operação em setembro/96, e após um regime de funcionamento permanente deu-se início à coleta e análise dos dados.

É conveniente ressaltar que o experimento no final do mês de fevereiro/97 foi alterado passando para *fluxo descontínuo*, tendo como finalidade verificar o comportamento dos parâmetros, como por exemplo, a variação da DBO na lagoa ao longo do tempo, uma vez que a DBO remanescente em dias distintos é diferente, regredindo ao longo do tempo. Porém, como os resultados observados de algumas lagoas não estavam correspondendo satisfatoriamente, resolveu-se, então, retornar ao experimento anterior, ou seja, com *vazão constante e fluxo contínuo*, sobretudo para avaliar o desempenho da lagoa de aguapés na estação de inverno. O experimento foi reiniciado no mês de maio/97, após a entrada em equilíbrio de funcionamento. Portanto, nos meses de março e abril/97 não foram executadas amostras deste experimento. O sistema de lagoas foi projetado sob a taxa de carga orgânica estimada como apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características operacionais das lagoas do sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA.

| PARÂMETROS  | L A G O A S |        |       |      |
|---|-------------|--------|-------|------|
|   | LA1         | LA2    | LF    | LAG  |
| Vazão<br>(m <sup>3</sup> /d)  | 3,0         | 3,0    | 3,0   | 3,0  |
| Tempo de detenção<br>(dia)  | 35,0        | 46,0   | 24,0  | 19,3 |
| Carga orgânica volumétrica<br>(kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> /d) | 0,286       | 0,0434 | 0,041 | -    |
| Carga orgânica superficial<br>(kgDBO <sub>5</sub> /ha/d)              | 4.857       | 956    | 354   | -    |

Nota: As cargas orgânicas foram estimadas com base em uma DBO<sub>5</sub> de 10.000 mg/l para a lagoa LA1. Para a lagoa LA2 foi estimada com uma redução de 80% e para a lagoa LF com uma redução de 90%.

### 3.2.3. Monitoramento de rotina

O monitoramento de rotina foi realizado no período de janeiro/96 a agosto/97 para o decantador e para a lagoa LA1, e nos períodos de fevereiro, março e outubro de 1996 até agosto de 1997, respectivamente para as lagoas LA2, LF e LAG, após uma fase inicial para a entrada em regime de estado estacionário de funcionamento. As coletas das amostras foram efetuadas semanalmente (quintas feiras), pela manhã, para todos os parâmetros, exceto para a análise da DQO, que foi feita duas vezes por semana (segundas e quintas feiras). A Tabela 3.3 apresenta a programação de amostragem efetuada no decantador e em cada lagoa da Unidade Experimental do CNPSA.

Tabela 3.3 - Programação de amostragem do decantador e das lagoas da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| Decant.<br>e lagoas | M E S E S |   |   |   |   |   |   | A M O S T R A D O S |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------|-----------|---|---|---|---|---|---|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                     | J         | F | M | A | M | J | J | A                   | S | O | N | D | J | F | M | A | M | J | J | A |
| DP                  | x         | x | x | x | x | x | x | x                   | x | x | x | x | x | x | * | * | x | x | x | x |
| LA1                 | x         | x | x | x | x | x | x | x                   | x | x | x | x | x | x | * | * | x | x | x | x |
| LA2                 |           | x | x | x | x | x | x | x                   | x | x | x | x | x | x | * | * | x | x | x | x |
| LF                  |           |   | x | x | x | x | x | x                   | x | x | x | x | x | x | * | * | x | x | x | x |
| LAG                 |           |   |   |   |   |   |   |                     |   | x | x | x | x | x | * | * | x | x | x | x |

\* Período em sistema descontínuo (não há dados).

### 3.2.4. Local de coleta e análises físico-químicas

As amostras do dejetto bruto e dos efluentes do decantador e de cada lagoa foram coletadas em baldes plásticos com capacidade de 3 litros, entre oito e nove horas da manhã, para todos os parâmetros, nos períodos de monitoramento. As coletas de amostras nas lagoas foram

realizadas em 5 (cinco) pontos distintos dentro de cada lagoa anaeróbia LA1 e LA2, localizados a 1,2; 1,9; 3,2; 5,0 e 7,5 metros; em 4 (quatro) pontos distintos da lagoa facultativa LF, localizados a 1,5; 4,0; 7,2 e 11,1 metros e em 3 (três) pontos distintos da lagoa de aguapés LAG, localizados a 6,2; 12,5 e 18,7 metros. Todas as amostras foram coletadas a 30 cm abaixo da superfície da água. A Figura 3.6 apresenta o fluxo hidráulico e o esquema dos pontos de coleta.

As amostras eram homogeneizadas nos recipientes, cerca de 1000 ml eram retirados por sifonamento e, em seguida, encaminhadas ao laboratório do CNPSA, distante a 300 m. Contudo, vale dizer que em razão da lagoa LAG entrar em operação e da grande quantidade de amostras a ser coletada e analisada, além de já se conhecer o regime de fluxo hidráulico pertencente às lagoas LA1, LA2 e LF, no mês de outubro/96 encerrou-se a coleta e análise de cada ponto ao longo do fluxo das respectivas lagoas. Na seqüência do experimento, os pontos coletados ao longo das lagoas, juntamente com seu efluente, constituíram um valor composto único, caracterizando o efluente de cada uma delas. A lagoa de aguapés, porém, começou a ser avaliada em outubro/96, e seu monitoramento ao longo do fluxo, isto é, em três pontos distintos dentro da mesma, avançou-se até fevereiro/97. Da mesma forma, os pontos coletados ao longo da lagoa e em seu ponto de saída caracterizaram o efluente da mesma. Como já enfatizado, nos meses de março e abril/97 não houve coleta deste tipo de experimento, uma vez que o processo foi alterado. Em maio/97 o procedimento anterior foi retomado com a coleta de amostras e análises de todos os parâmetros nos afluentes e efluentes de cada unidade, os quais juntamente com seus respectivos valores anteriores compuseram os afluentes e efluentes do *decantador* e das lagoas *anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG* desta pesquisa.

De cada amostra foram determinados os seguintes parâmetros: pH, Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos (SF), Sólidos Voláteis (SV), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>), Nitrogênio Total (NT), Fósforo Total (PT), Coliformes Fecais (CF) e Temperatura, de acordo com os métodos estabelecidos pelo "Standard Methods" (APHA - AWWA - WEF, 1992).

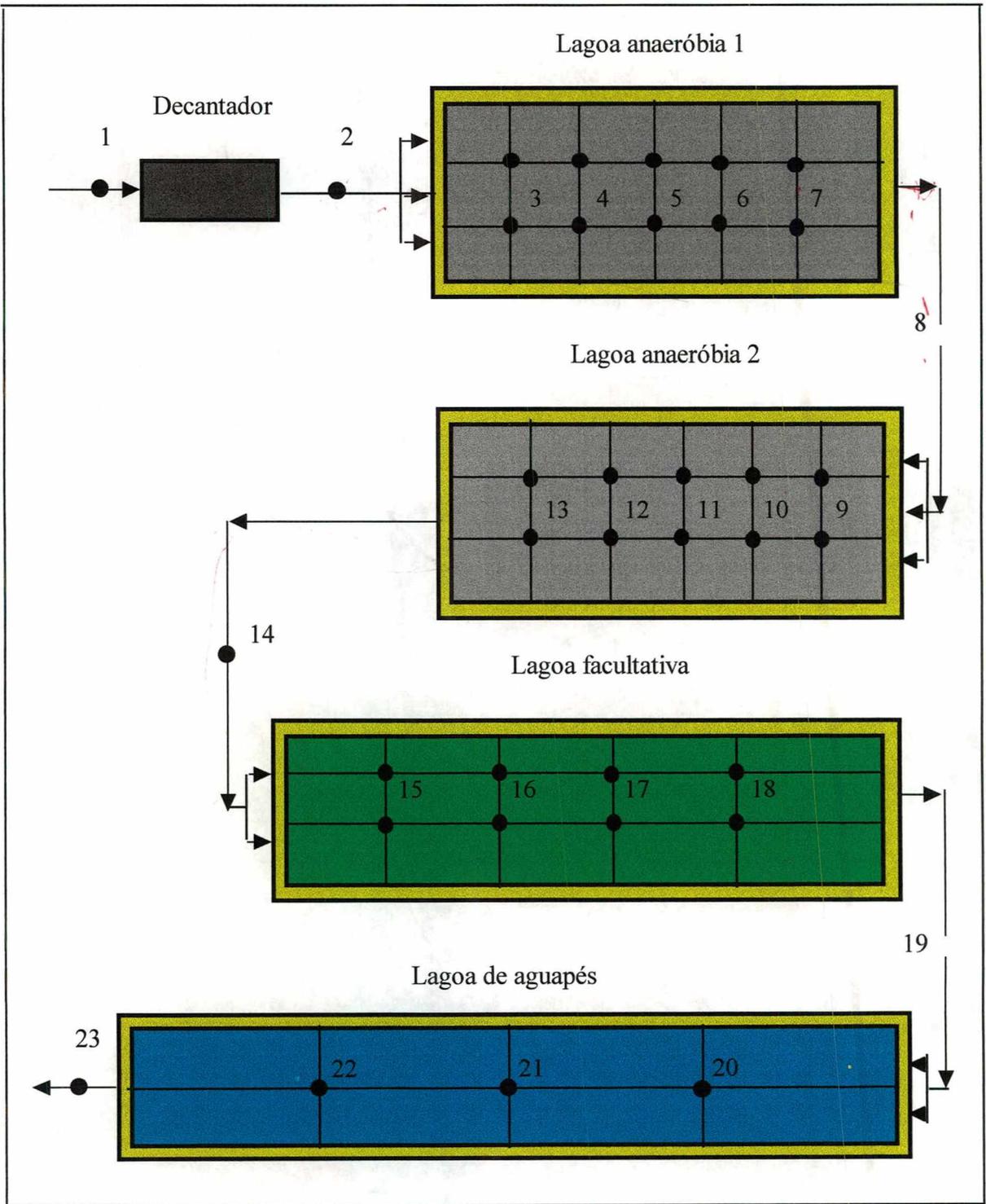


Fig. 3.6 - Diagrama do fluxo hidráulico e pontos de coleta das lagoas do sistema de tratamento da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA.

A Temperatura da água de cada lagoa foi medida no local, isto é, diretamente na própria lagoa, através do microprocessador da HANNA, modelo HI 9145.

Os Sólidos Totais, Voláteis e Fixos foram determinados pelo processo gravimétrico, com a utilização de estufa e mufla.

O Nitrogênio Total foi medido através do processo de digestão de amostra com  $H_2SO_4$  e catalizador, e destilação do nitrogênio, de acordo com o método Kjeldahl.

O Fósforo Total foi determinado através do espectrofotômetro de UV/VIS 420 nm, utilizando o método molibdato/meta-vanadato de amônia.

O pH foi medido usando o aparelho pHmeter da HANNA, modelo HI 9145.

A DBO foi medida pelo método manométrico, usando o equipamento modelo 2173B - HACH.

A DQO foi determinada através do método da oxidação em meio ácido com Dicromato de Potássio e leituras da absorbância no espectrofotômetro DR/200 - HACH.

Os Coliformes Fecais foram determinados com a utilização do Kit de análises Collilert. A leitura foi efetuada com a utilização de lâmpada UV fluorescente de 6 W, e comprimento de onda 365 nm.

Além desses parâmetros, foram determinadas na Estação Meteorológica do CNPSA, situada aproximadamente a 500 m da UNETDS, as temperaturas máximas, mínimas e médias diárias ( $^{\circ}C$ ), a taxa de insolação (horas de sol/dia), direção do vento, além de outros parâmetros apresentados posteriormente na Tabela (4.12), no capítulo 4.

### 3.3. Descrição do sistema de tratamento de dejetos suínos COOPERCENTRAL - AURORA

O sistema de tratamento de dejetos suínos da Cooperativa Central Oeste de Santa Catarina consiste de um equalizador, seguido por uma peneira vibratória para separação sólido-líquido, duas lagoas anaeróbias (LA1) e (LA2), uma aerada (LE), duas facultativas (LF1) e (LF2) e uma de maturação (LM). As lagoas são arredondadas, sendo suas áreas superficiais no topo maiores que no fundo.

Ao lado deste sistema, encontra-se a granja de suínos contendo três galpões com 1950 animais, sendo 400 leitões em amamentação com peso de até 10 kg; 350 em crescimento com peso de 10 a 50 kg; 300 em terminação, pesando entre 50 a 70 kg; 550 em engorda entre 70 e 150 kg e 350 com peso maior do que 150 kg.

O equalizador armazena os dejetos de suínos provenientes da suinocultura e, através do acionamento de uma bomba, alimenta o sistema de tratamento, passando antes pela peneira, a qual visa diminuir a concentração da carga orgânica, evitando assoreamento e a produção de maus odores causados pelo acúmulo de sólidos na lagoa anaeróbia. A Tabela 3.4 mostra as características físicas das lagoas utilizadas na pesquisa, e a Figura 3.7 apresenta o fluxograma do sistema de tratamento.

Tabela 3.4 - Características físicas das lagoas de estabilização do sistema de tratamento da COOPERCENTRAL/AURORA.

| DIMENSÕES                         | L A G O A S |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                   | LA1         | LA2 | LE  | LF1 | LF2 | LM  |
| Superfície topo (m <sup>2</sup> ) | 300         | 200 | 135 | 135 | 400 | 700 |
| Profundidade média (m)            | 3,3         | 2,2 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,8 |
| Profundidade máxima (m)           | 4,0         | 4,0 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 0,8 |
| Volume (m <sup>3</sup> )          | 700         | 450 | 187 | 187 | 450 | 560 |

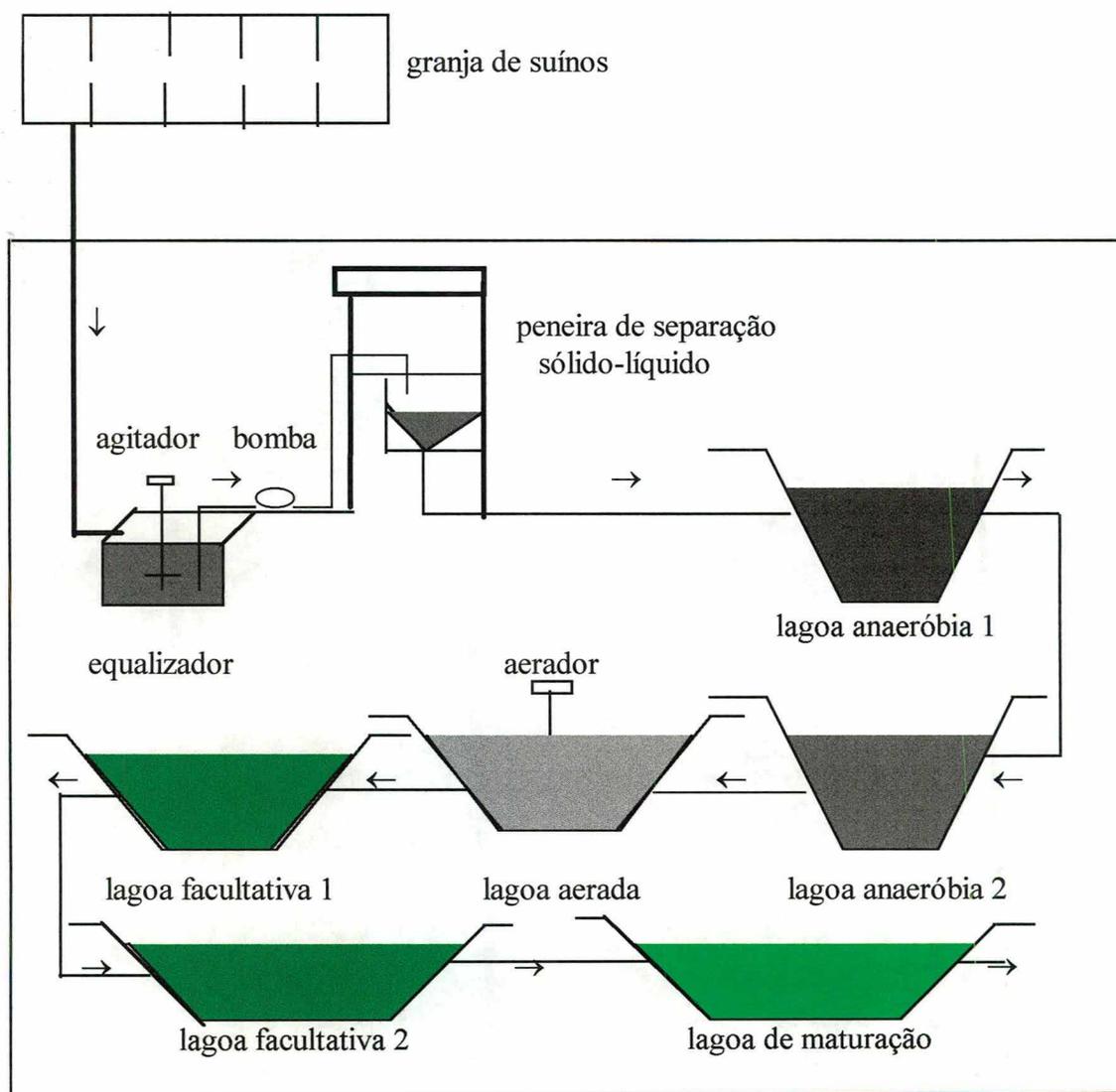


Fig. 3.7 - Esquema do sistema de tratamento de dejetos suínos da Cooperativa Central do Oeste de Santa Catarina - COOPERCENTRAL - AURORA.

### 3.3.1. Alimentação do sistema e carga das lagoas

O sistema de lagoas recebe resíduos orgânicos altamente concentrados produzidos pelos animais e variados conforme o uso da água para higienização da granja. Estes resíduos são conduzidos por gravidade da granja ao sistema de lagoas; apenas a passagem do equalizador à peneira vibratória é feita através de bomba peristáltica. A vazão média é de 30,0 m<sup>3</sup>/dia, resultando em tempo de detenção total do sistema de aproximadamente 86,6 dias. O experimento ocorreu no período de fevereiro a novembro de 1996. A Tabela 3.5 apresenta as características operacionais das lagoas.

Tabela 3.5 - Características operacionais das lagoas do sistema de tratamento da COOPERCENTRAL - AURORA.

| PARÂMETROS  | L A G O A S |       |      |       |      |      |
|---|-------------|-------|------|-------|------|------|
|   | LA1         | LA2   | LE   | LF1   | LF2  | LM   |
| Vazão<br>(m <sup>3</sup> /d)  | 30,0        | 30,0  | 30,0 | 30,0  | 30,0 | 30,0 |
| Tempo de detenção<br>(dia)  | 25,6        | 15,0  | 6,2  | 6,2   | 15,0 | 18,6 |
| Carga orgânica aplicada<br>(kgDBO <sub>5</sub> /d)                    | 145,5       | 108,0 | 33,7 | 30,7  | 27,7 | 22,5 |
| Carga de sólidos aplicada<br>(kgSV/d)                                 | 223,5       | 90,4  | 64,1 | 59,0  | 39,4 | 38,2 |
| Carga orgânica volumétrica<br>(kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> /d) | 0,19        | 0,24  | 0,18 |       |      |      |
| Carga de sólidos volumétrica<br>(kgSV/m <sup>3</sup> /d)              | 0,29        | 0,20  | 0,34 |       |      |      |
| Carga orgânica superficial<br>(kgDBO <sub>5</sub> /ha/d)              |             |       |      | 1.653 | 617  | 423  |

### 3.3.2. Monitoramento de rotina

O sistema de tratamento foi monitorado no período de fevereiro a novembro de 1996. Esse monitoramento foi realizado para o dejetos bruto e nos efluentes do equalizador, da peneira

vibratória, e das lagoas, através de coletas mensais. No entanto, houve mês em que a coleta procedeu duas vezes, perfazendo-se um total de treze amostragens. As amostras eram preservadas em embalagem de isopor a  $-4^{\circ}\text{C}$  e enviadas no mesmo dia de coleta para o CNPSA/EMBRAPA, Laboratório de Análise de Efluentes, em Concórdia/SC. Foram medidos os seguintes parâmetros: DBO, DQO, ST, SF, SV, NT, PT, pH, e Temperatura, seguindo os procedimentos padrões “Standard Methods” (APHA - AWWA - WEF, 1992), já adotados para as outras lagoas.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES**

#### **4.1. Apresentação dos resultados experimentais**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do monitoramento de rotina obtidos nos experimentos realizados no sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, após o regime de estado estacionário de cada lagoa, e no sistema de tratamento de dejetos suínos da COOPERCENTRAL/AURORA.

Os dois sistemas foram caracterizados por diferentes tipos de operação, não permitindo uma comparação direta entre si. O sistema de tratamento da COOPERCENTRAL já se encontrava em funcionamento desde 1991, consistindo de uma peneira vibratória e de seis lagoas, em série, com tempo de detenção hidráulico total de 86,6 dias. O sistema experimental do CNPSA/EMBRAPA foi construído para a realização desta pesquisa, contendo um equalizador, um decantador e quatro lagoas dispostas em série, com um tempo de detenção total de 125 dias.

#### **4.2. Sistema de tratamento de dejetos suínos UNETDS - CNPSA/EMBRAPA**

Os valores médios, mínimos e máximos, obtidos no sistema de tratamento de dejetos suínos da Unidade Experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, são apresentados na Tabela 4.1 (afluentes) e na Tabela 4.2 (efluentes), já que o início de operação de cada lagoa foi caracterizado por datas diferenciadas, como descrito no item 3.2.2.

Tabela 4.1 - Resultados do sistema experimental CNPSA/EMBRAPA, baseados no monitoramento de rotina de amostras, referentes aos *afluentes* do decantador e de de cada lagoa nos seus respectivos períodos de operação (tempo de detenção total =125 dias).

| Médio,<br>Mínimo e<br>Máximo dos | <u>afluentes do decantador (dejeito bruto) e das lagoas</u> |        |        |       |       |
|----------------------------------|---|--------|--------|-------|-------|
|                                  | DP  | LA1    | LA2    | LF    | LAG   |
| DBO <sub>5</sub><br>(mg/l)       | 11.979  | 8.304  | 2.137  | 831   | 454   |
|                                  | 3.500   | 3.000  | 1.100  | 350   | 140   |
|                                  | 27.500  | 13.500 | 3.067  | 1.450 | 650   |
| DQO<br>(mg/l)                    | 21.647  | 15.153 | 3.281  | 1.498 | 844   |
|                                  | 4.300   | 4.570  | 1.435  | 507   | 290   |
|                                  | 81.200  | 47.200 | 7.095  | 3.296 | 1.730 |
| ST<br>(mg/l)                     | 17.240  | 9.950  | 4.660  | 3.391 | 2.512 |
|                                  | 4.209   | 3.788  | 3.170  | 940   | 1.400 |
|                                  | 78.866  | 26.660 | 10.254 | 5.284 | 3.224 |
| SF<br>(mg/l)                     | 6.974   | 4.056  | 2.503  | 2.013 | 1.498 |
|                                  | 1.584   | 577    | 1.357  | 377   | 632   |
|                                  | 56.190  | 14.839 | 5.100  | 2.654 | 2.265 |
| SV<br>(mg/l)                     | 10.266  | 5.894  | 2.156  | 1.378 | 1.014 |
|                                  | 2.777   | 1.670  | 897    | 563   | 568   |
|                                  | 66.534  | 21.127 | 5.154  | 3.879 | 2.006 |
| NT<br>(mg/l)                     | 2.205   | 1.825  | 1.424  | 1.005 | 420   |
|                                  | 1.018   | 850    | 888    | 597   | 150   |
|                                  | 4.451   | 3.931  | 3.790  | 1.324 | 667   |
| PT<br>(mg/l)                     | 633   | 391    | 141    | 69    | 56    |
|                                  | 119   | 70     | 27     | 30    | 24    |
|                                  | 2.306   | 896    | 780    | 121   | 97    |

Tabela 4.2 - Resultados do sistema experimental CNPSA/EMBRAPA, baseados no monitoramento de rotina de amostras, referentes aos *efluentes* do decantador e de cada lagoa nos seus respectivos períodos de operação (tempo de detenção total = 125 dias).

| Médio,<br>Mínimo e<br>Máximo dos | efluentes do decantador (dejeito bruto) e das lagoas |        |       |       |       |
|----------------------------------|--|--------|-------|-------|-------|
|                                  | DP   | LA1    | LA2   | LF    | LAG   |
| DBO <sub>5</sub><br>(mg/l)       | 8.304  | 1.833  | 778   | 435   | 213   |
|                                  | 3.000  | 758    | 347   | 100   | 70    |
|                                  | 13.500   | 3.067  | 1.450 | 700   | 750   |
| DQO<br>(mg/l)                    | 15.153   | 3.308  | 1.439 | 807   | 355   |
|                                  | 4.570  | 1.100  | 507   | 290   | 160   |
|                                  | 47.200   | 7.095  | 3.296 | 1.730 | 830   |
| ST<br>(mg/l)                     | 9.950  | 4.773  | 3.266 | 2.254 | 1.320 |
|                                  | 3.788  | 3.193  | 940   | 1.247 | 229   |
|                                  | 26.660   | 10.254 | 5.284 | 3.224 | 2.400 |
| SF<br>(mg/l)                     | 4.056  | 2.543  | 1.962 | 1.360 | 779   |
|                                  | 577  | 1.357  | 377   | 632   | 41    |
|                                  | 14.839   | 5.100  | 2.654 | 2.265 | 1.672 |
| SV<br>(mg/l)                     | 5.894  | 2.230  | 1.305 | 894   | 541   |
|                                  | 1.670  | 897    | 563   | 448   | 188   |
|                                  | 21.127   | 5.154  | 3.879 | 2.006 | 1.144 |
| NT<br>(mg/l)                     | 1.825  | 1.409  | 970   | 413   | 173   |
|                                  | 850  | 888    | 563   | 150   | 57    |
|                                  | 3.931  | 3.790  | 1.324 | 702   | 328   |
| PT<br>(mg/l)                     | 391  | 140    | 67    | 48    | 26    |
|                                  | 70   | 27     | 21    | 20    | 9     |
|                                  | 896  | 780    | 121   | 97    | 53    |

Além desses valores, foram calculadas as médias para as amostras coletadas ao longo do fluxo das lagoas (Figura 3.6), como mostram as Tabelas I.1 - I.5, anexo I. Nessas Tabelas, nota-se que os resultados ao longo do fluxo das lagoas mostraram-se quase idênticos, evidenciando um sistema próximo ao de *Mistura Completa*, apesar da relação geométrica comprimento/largura existente entre elas. Entretanto, como já foi enfatizado, este tipo de coleta e análise para as lagoas LA1, LA2 e LF foram interrompidos no mês de outubro/96. Na seqüência do experimento, os pontos coletados ao longo do fluxo da lagoa, juntamente com seu efluente, constituíram uma amostra composta única, a qual foi caracterizada como efluente da lagoa.

Os resultados deste experimento mostram que o sistema de lagoas de estabilização em série, de uma maneira geral, apresentou uma eficiência significativa na remoção de sólidos (ST, SF, SV), de matéria orgânica (DBO<sub>5</sub>, DQO) e de nutrientes (NT, PT), atribuída ao longo tempo de detenção, em torno de 125 dias, favorecendo as atividades das bactérias na redução dos compostos orgânicos afluentes e no processo físico de sedimentação.

#### **4.2.1. Demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>)**

Durante o experimento realizado no decantador e na série de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, a DBO<sub>5</sub> total foi reduzida de 11.979 mg/l (dejeito bruto) para 213 mg/l no efluente da lagoa LAG (Tabelas 4.1 e 4.2), correspondendo a uma remoção total de aproximadamente 98%. Como se nota, uma boa eficiência de remoção, no entanto, em razão da elevada concentração de DBO<sub>5</sub> no dejeito bruto, o efluente final ainda necessita da continuação do tratamento para remoção da DBO<sub>5</sub> remanescente, uma vez que se encontra acima dos padrões estabelecidos pela Legislação Ambiental de Santa Catarina, Decreto 14.250 de 05.06.81, o qual determina: “*as concentrações máximas permissíveis para lançamento dos despejos nos corpos de água receptores de 60 mg/l, ou redução da carga poluidora em termos de DBO<sub>5</sub> em no mínimo 80% e não conferir ao corpo receptor características em desacordo com os critérios e padrões de qualidade da água para a classe na qual esse está enquadrado*”. A porcentagem de remoção da série de lagoas (LA1, LA2, LF e LAG) foi da ordem de 97%. A DBO<sub>5</sub> é fortemente removida na lagoa anaeróbia LA1, cerca de 78%, concordando com a do projeto. As remoções

nas lagoas LA2, LF e LAG foram em torno de 64%, 48% e 53%, respectivamente, enquanto que a remoção do decantador foi de 31% (Tabelas II.1-II.5, anexo II). O comportamento da DBO<sub>5</sub> ao longo do período de monitoramento pode ser observado na Figura 4.1.

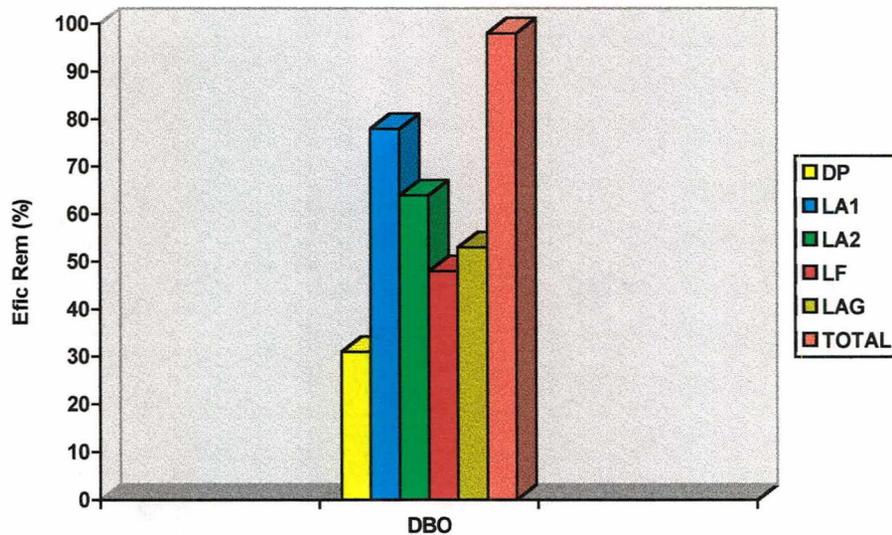


Fig. 4.1 - Eficiência de remoção da DBO no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.

As lagoas LA1 e LA2 apresentam-se anaeróbias em toda sua profundidade. A lagoa anaeróbia LA2 operou, em média, com carga volumétrica abaixo de  $0,1 \text{ kg/m}^3/\text{d}$  (Tabela 4.3), valor mínimo freqüentemente recomendado para manter condições anaeróbias (Mara e Pearson, 1986).

Os resultados deste experimento indicaram que o regime hidráulico destas lagoas é próximo ao de mistura completa, por possibilitar uma “imediate” dispersão do poluente quase que por completamente por toda a lagoa, fazendo com que a sua concentração ao adentrá-la seja logo

“igualada” à concentração efluente da mesma, apesar da relação geométrica comprimento/largura que existe entre elas, conforme descrito no item 3.2.1.

Durante o monitoramento observou-se que o valor da constante de degradação varia de lagoa para lagoa. Assim, os coeficientes  $k$  da DBO e da DQO para as lagoas LA1, LA2, LF e LAG da UNETDS foram determinados admitindo-se a taxa de degradação através da cinética de primeira ordem e utilizando-se o modelo de mistura completa, e considerando-se as concentrações médias na entrada e na saída e o tempo de detenção. O valor de  $k$  (DBO) foi de  $0,101 \text{ d}^{-1}$  para a lagoa LA1 com tempo de detenção de 35 dias, diminuindo para  $0,038 \text{ d}^{-1}$  para a lagoa LA2 com 46 dias de detenção, permanecendo esse valor ( $0,038 \text{ d}^{-1}$ ) para a lagoa LF e aumentando para a lagoa LAG  $0,059 \text{ d}^{-1}$ . O valor de  $k$  para a série de lagoas foi de aproximadamente  $0,05 \text{ d}^{-1}$ . Estes valores de  $k$  foram determinados com as temperaturas médias de  $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$  para a lagoa LA1;  $20,6 \text{ }^\circ\text{C}$  para a lagoa LA2;  $19,8 \text{ }^\circ\text{C}$  para a lagoa LF e  $22,1 \text{ }^\circ\text{C}$  para a lagoa LAG.

Embora a cinética de remoção da DBO seja a mesma para as duas lagoas anaeróbias LA1 e LA2 (cinética de primeira ordem), a taxa de remoção da DBO é tanto mais elevada quanto maior for a concentração de DBO do meio. Além disso, dois fatores básicos podem ter acontecido para o baixo valor de  $k$  para a lagoa LA2: o primeiro é que a degradação da matéria orgânica mais facilmente biodegradável deve ter ocorrido na lagoa antecedente LA1; e o segundo, provavelmente, decorrente ao maior tempo de detenção da lagoa LA2. Este fato foi observado por Silva (1982) através de experimentos comparativos efetuados em sistemas de lagoas para tratamento de esgoto doméstico na EXTRABES, nos quais constatou que o acréscimo do valor da constante de degradação de lagoas de estabilização, com as mesmas características, ocorre devido ao decréscimo do tempo de detenção.

Os valores das cargas orgânicas aplicadas de DBO superficial e volumétrica em todas as lagoas, durante os respectivos períodos experimentais são apresentados na Tabela 4.3, assim como suas correspondentes remoções.

Tabela 4.3 - Cargas de DBO<sub>5</sub> superficial e volumétrica (aplicada e removida) para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, nos períodos de janeiro (LA1), fevereiro (LA2), março (LF) e outubro (LAG) de 1996 a agosto de 1997.

| LAGOA | Carga superficial (kg/ha/d) |            | Carga volumétrica (kg/m <sup>3</sup> /d) |            |
|-------|-----------------------------|------------|--|------------|
|       | aplicada                    | - removida | aplicada                                 | - removida |
| LA1   | 4.033                       | 3.143      | 0,237                                    | 0,185      |
| LA2   | 1.022                       | 650        | 0,046                                    | 0,030      |
| LF    | 294                         | 140        | 0,035                                    | 0,017      |
| LAG   | 188                         | 100        | 0,024                                    | 0,012      |

As lagoas anaeróbias LA1 e LA2 funcionaram com cargas orgânicas volumétricas de DBO<sub>5</sub> em torno de 0,24 e 0,05 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia, respectivamente, e cargas de sólidos voláteis de aproximadamente 0,17 e 0,05 kg SV/m<sup>3</sup>/dia. Estes valores estão de acordo com Loehr (1974), que sugere cargas orgânicas volumétricas satisfatórias entre 0,24 e 0,32 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia e entre 0,005 a 0,17 kg SV/m<sup>3</sup>/dia para todos os tipos de dejetos de animais, e com Mara e Pearson (1986), que recomendam cargas entre 0,1 e 0,3 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/dia para lagoas anaeróbias, uma vez que valores menores que o primeiro limite impede o desenvolvimento de condições anaeróbias e valores maiores que o segundo limite causam níveis inaceitáveis de odor liberado.

A lagoa facultativa, por sua vez, recebe carga orgânica superficial por volta de 290 kg DBO<sub>5</sub>/ha/dia, estando em conformidade com as lagoas facultativas utilizadas na Região Oeste de Santa Catarina (Costa et al, 1995a), que recebem carga superficial aplicada da ordem de 85 a 300 kg DBO<sub>5</sub>/ha/dia.

#### 4.2.2. Demanda química de oxigênio (DQO)

Os valores médios observados da DQO, do sistema experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2, mostram que houve uma redução de

98% no sistema, passando de 21.647 mg/l, na entrada do decantador, para 355 mg/l na saída da última lagoa (LAG). O decantador removeu cerca de 30% da DQO (Tabela II.1 - II.5, anexo II). A lagoa anaeróbia LA1 é responsável pelo maior percentual de remoção (78%), enquanto nas outras lagoas a DQO foi removida em 56%, 46% e 58% respectivamente para LA2, LF e LAG. A Figura 4.2 apresenta a eficiência de remoção da DQO ao longo do período de monitoramento.

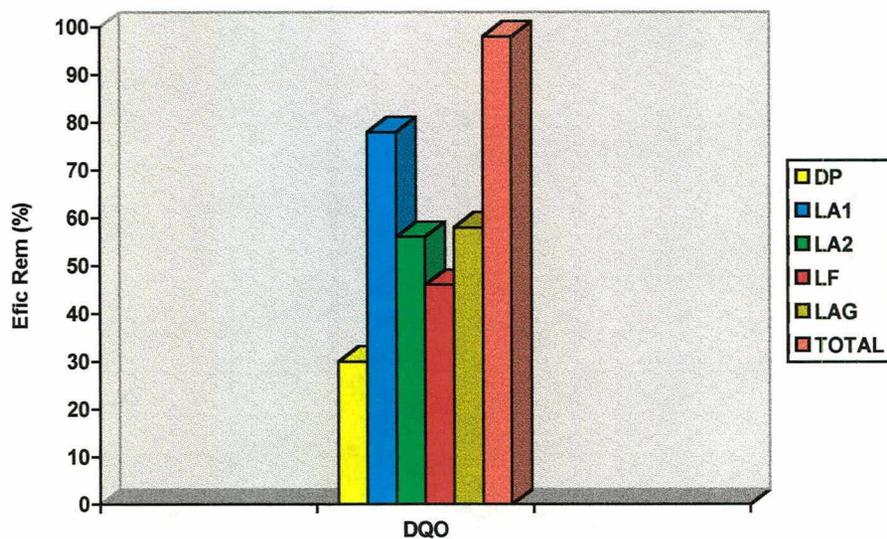


Fig. 4.2 - Eficiência de remoção da DQO no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.

Observa-se que a eficiência de remoção da poluição carbonácea (DQO,  $DBO_5$ ) é feita em sua maior parte na lagoa anaeróbia primária LA1 (78%). A lagoa anaeróbia secundária LA2, que recebe efluentes da lagoa LA1, possui um tempo de detenção maior, no entanto houve um decréscimo quanto à eficiência de remoção da matéria carbonácea. Isso pode ser explicado pelo fato da poluição remanescente ser mais resistente à biodegradação.

As constantes de degradação de primeira ordem para remoção da DQO acompanharam o mesmo padrão de comportamento que o da DBO, para cada lagoa, com valores de  $0,102 \text{ d}^{-1}$  e  $0,028 \text{ d}^{-1}$ , respectivamente para as lagoas anaeróbias LA1 e LA2;  $0,036 \text{ d}^{-1}$  para a lagoa LF e  $0,069$  para a lagoa LAG. Isto vem confirmar que o baixo valor da constante de degradação da DQO da lagoa LA2 em comparação com a lagoa LA1 se deve, possivelmente, à menor concentração da DQO do meio líquido associada à matéria orgânica mais resistente à biodegradação e, principalmente, ao acréscimo do tempo de detenção da lagoa LA2.

As cargas orgânicas da DQO superficial e volumétrica em cada lagoa do sistema são apresentadas na Tabela 4.4, durante os seus respectivos períodos experimentais, assim como suas correspondentes remoções.

Tabela 4.4 - Cargas de DQO superficial e volumétrica (aplicada e removida) para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, nos períodos de janeiro (LA1), fevereiro (LA2), março (LF) e outubro (LAG) de 1996 a agosto de 1997.

| LAGOA | Carga superficial (kg/ha/d) |            | Carga volumétrica (kg/m <sup>3</sup> /d) |            |
|-------|-----------------------------|------------|--|------------|
|       | aplicada                    | - removida | aplicada                                 | - removida |
| LA1   | 7.360                       | 5.753      | 0,433                                    | 0,338      |
| LA2   | 1.569                       | 881        | 0,071                                    | 0,040      |
| LF    | 531                         | 245        | 0,063                                    | 0,029      |
| LAG   | 350                         | 203        | 0,044                                    | 0,025      |

Os resultados médios mensais da DQO monitorados ao longo do sistema são apresentados nas Tabelas III.1 - III.5, anexo III. As Figuras 4.3 a 4.6 mostram sua evolução na entrada e na saída de cada lagoa.

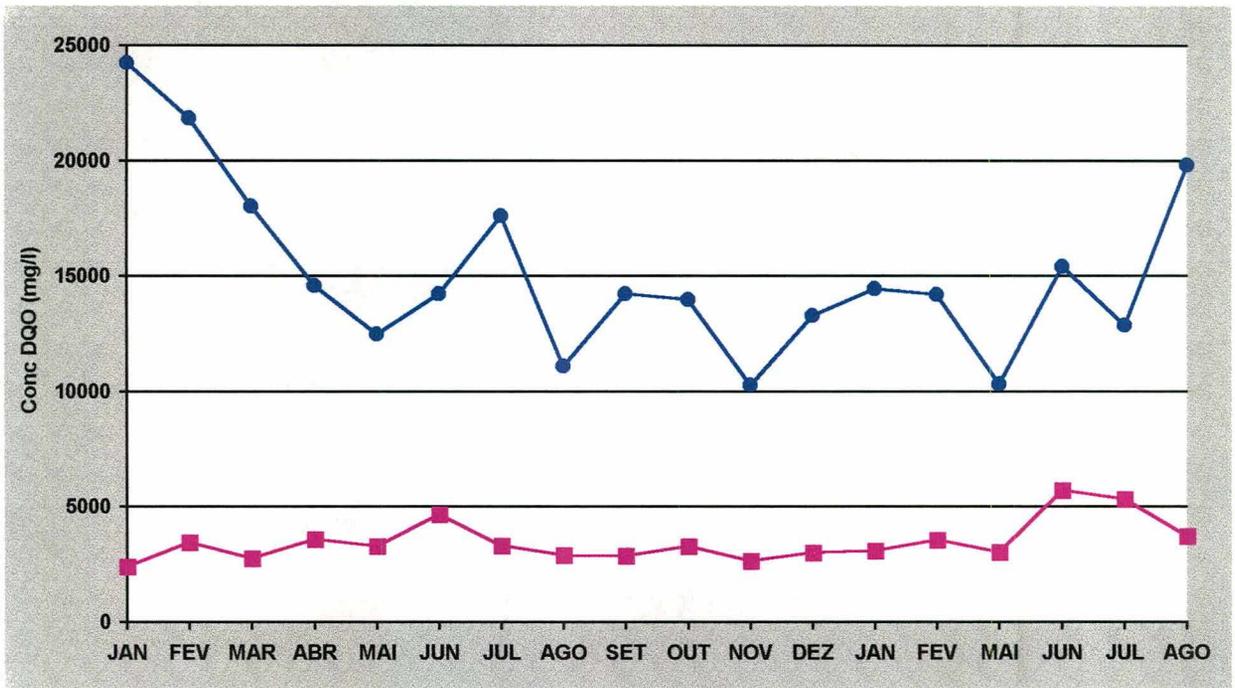


Fig. 4.3 - Concentrações médias mensais da DQO do (O) afluente e do (□) efluente da lagoa anaeróbia LA1 do CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro/96 a agosto/97.

Observa-se na Figura 4.3 que a DQO afluente na lagoa LA1 foi bastante variável ao longo dos meses monitorados, com médias mensais entre 10.282 e 24.255 mg/l (Tabela III.2, anexo III), resultando uma média, para o período, de 15.153 mg/l, enquanto que o efluente oscilou com médias de 2.406 a 5.721 mg/l, tendo uma média para o período de 3.308 mg/l. Essa redução observada é devido, principalmente, ao processo físico de sedimentação e de digestão anaeróbia. As flutuações mais elevadas na concentração da DQO afluente não causaram uma variação desta magnitude no efluente da lagoa.

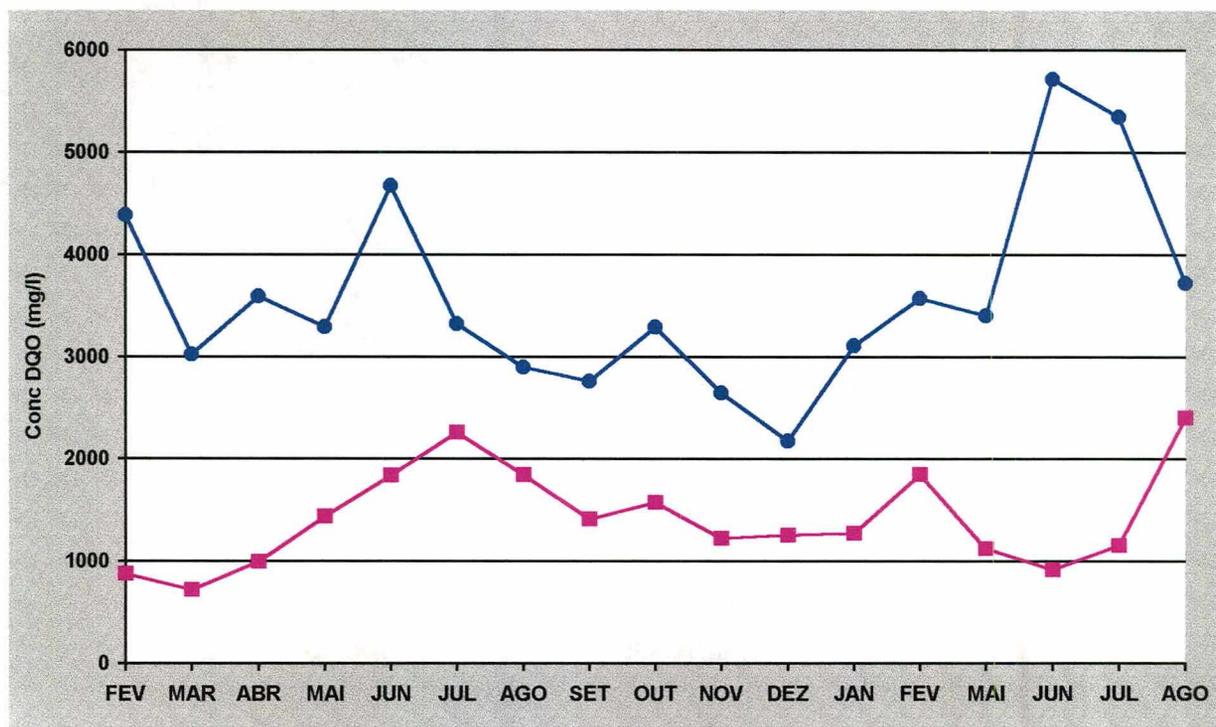


Fig. 4.4 - Concentrações médias mensais da DQO do (O) afluente e do (□) efluente da lagoa anaeróbia LA2 do CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro/96 a agosto/97.

As concentrações médias da DQO, ao longo dos meses amostrados, na lagoa LA2 estiveram entre 2.178 e 5.721 mg/l (Tabela III.3, anexo III) no afluente, resultando uma média de 3.281 mg/l, ao passo que o efluente variou entre 719 e 2.403 mg/l, com média de 1.439 mg/l, sendo que as oscilações mais altas ocorreram no afluente.

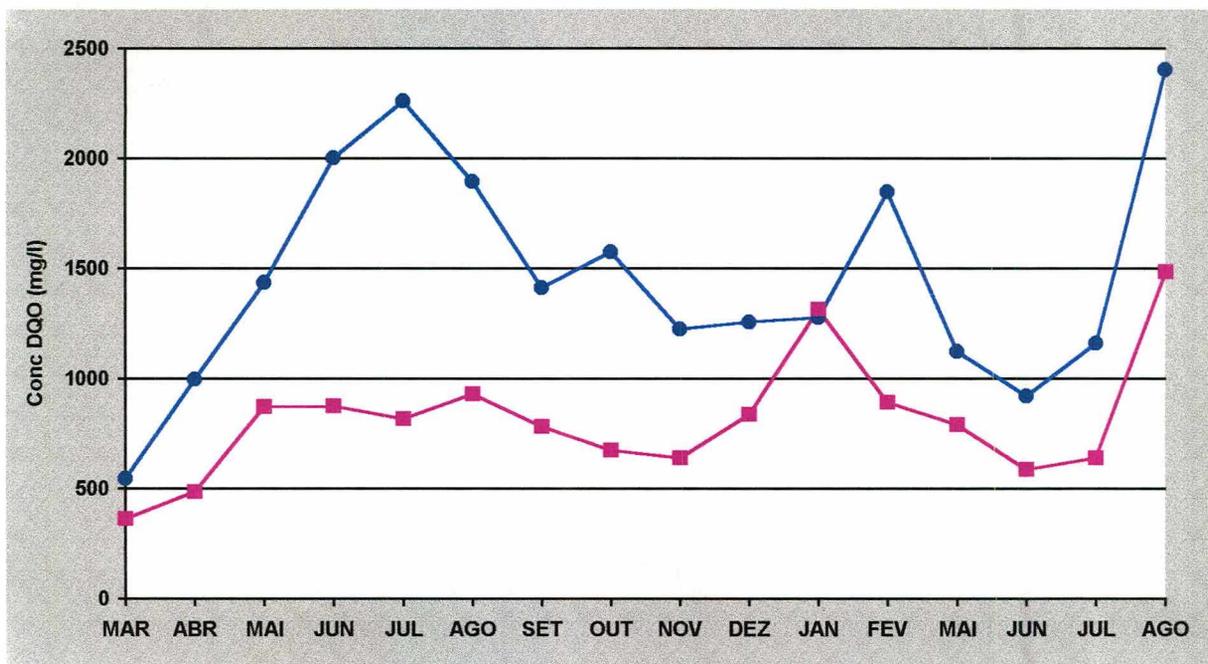


Fig. 4.5 - Concentrações médias mensais da DQO do (O) aflúente e do (□) efluente da lagoa facultativa LF do CNPSA/EMBRAPA, no período de março/96 a agosto/97.

A lagoa facultativa LF apresentou flutuações médias mensais de DQO entre 546 e 2.403 mg/l (Tabela III.4, anexo III) no aflúente, com média de 1.498 mg/l, e entre 363 e 1.487 mg/l para o efluente, tendo média de 807 mg/l.

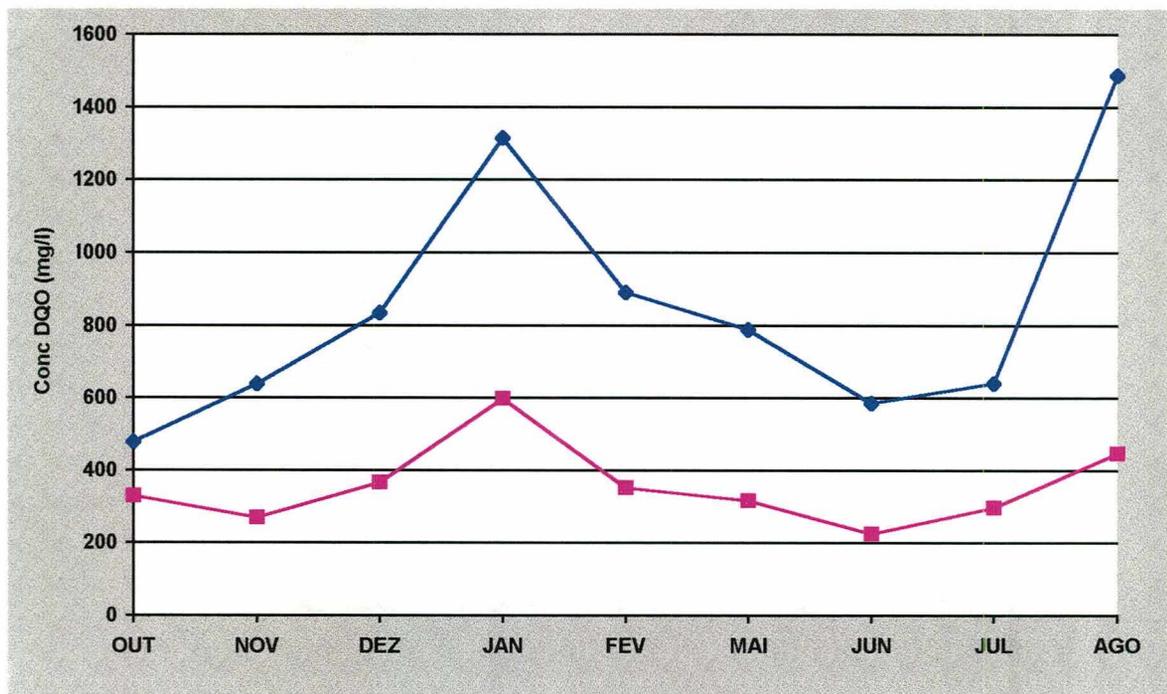


Fig. 4.6 - Concentrações médias mensais da DQO do (O) afluente e do (□) efluente da lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro/96 a agosto/97.

A lagoa de aguapés LAG apresentou variações médias mensais de DQO entre 478 e 1.487 mg/l (Tabela III.5, anexo III) no afluente, com média de 844 mg/l, e entre 270 e 599 mg/l no efluente, tendo média de 355 mg/l.

Este estudo não foi estendido para a DBO devido a problemas técnicos com o aparelho *DBO manométrica* no decorrer do experimento, não permitindo a execução da análise nos meses de julho, agosto e setembro de 1996.

### 4.2.3. Sólidos

Os sólidos totais e voláteis baixaram de 17.240 mg/l (ST) e 10.266 mg/l (SV) no dejetto bruto, para 1.320 mg/l (ST) e 541 mg/l (SV) no efluente da lagoa de aguapés LAG (Tabela 4.1 e 4.2), o que traduz uma remoção total de cerca de 92% e 95%, respectivamente. Destas reduções, a lagoa LA1 participou com maior parte, 52% de ST e 62% de SV, ou seja, os ST reduziram de 9.950 para 4.773 mg/l, enquanto os SV diminuíram de 5.894 para 2.230 mg/l. O decantador removeu 42% de ST e 43% de SV. Estes valores são próximos aos divulgados por Safley et al (1997) em separadores mecânicos, cujas reduções encontradas foram de 40% de ST e 50% de SV, e por Costa et al (1996), que encontraram remoção entre 30 e 60% de ST e entre 35 e 65% de SV. As porcentagens de remoção das lagoas LA2, LF e LAG foram da ordem de 30, 34 e 47% de ST, respectivamente (Tabelas II.1-II.5, anexo II), e de 39, 35 e 47% de SV, respectivamente. A Figura 4.7 apresenta os percentuais de remoção dos sólidos (ST, SF e SV) em cada lagoa e no sistema total.

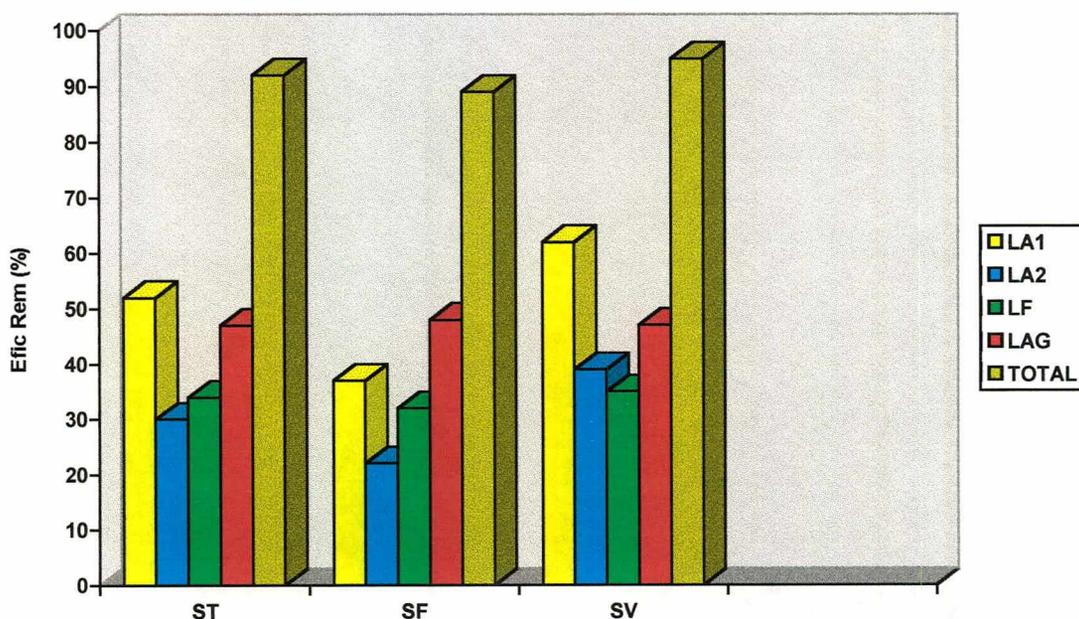


Fig 4.7 - Eficiência de remoção do ST, SF e SV nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.

Os valores médios dos sólidos apresentados na Tabela 4.1 mostram uma elevada concentração dos sólidos voláteis (10.266 mg/l) no dejetto bruto, em relação aos sólidos fixos (6.974 mg/l), causadas pelo elevado teor de matéria orgânica não mineralizada. Observa-se porém que, devido ao processo de mineralização através das lagoas, as concentrações dos sólidos fixos no efluente da lagoa de aguapés (779 mg/l) se mostraram superiores às dos sólidos voláteis (541 mg/l).

A remoção dos sólidos em um sistema de lagoas decorre do processo de estabilização da matéria orgânica, que determina como produto um material hidrolizado, através da oxidação biológica. Assim, a temperatura é um fator fundamental para a redução deste parâmetro. Os resultados obtidos no período em estudo indicam que o sistema de lagoas em série do CNPSA mantém um efluente final com uma concentração em torno de 1.300 mg/l ou 0,13% de matéria seca.

#### **4.2.4. Nitrogênio total**

As concentrações médias observadas do nitrogênio total do afluente do decantador (dejetto bruto) ao efluente da lagoa de aguapés, mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2, reduziram-se fortemente. O nitrogênio total foi reduzido de 2.205 para 173 mg/l, correspondendo a uma remoção da ordem de 92%. As lagoas facultativa e de aguapés, mesmo com tempo de detenção (24 e 20 dias, respectivamente) inferior às lagoas anaeróbias primária e secundária (35 e 46 dias, respectivamente), tiveram melhor desempenho, 59% de remoção em ambas as lagoas LF e LAG (Tabelas II.1 - II.5, anexo II) contra 23% para a lagoa LA1 e 32% para a lagoa LA2. A Figura 4.8 apresenta as remoções do nitrogênio total para cada etapa do sistema.

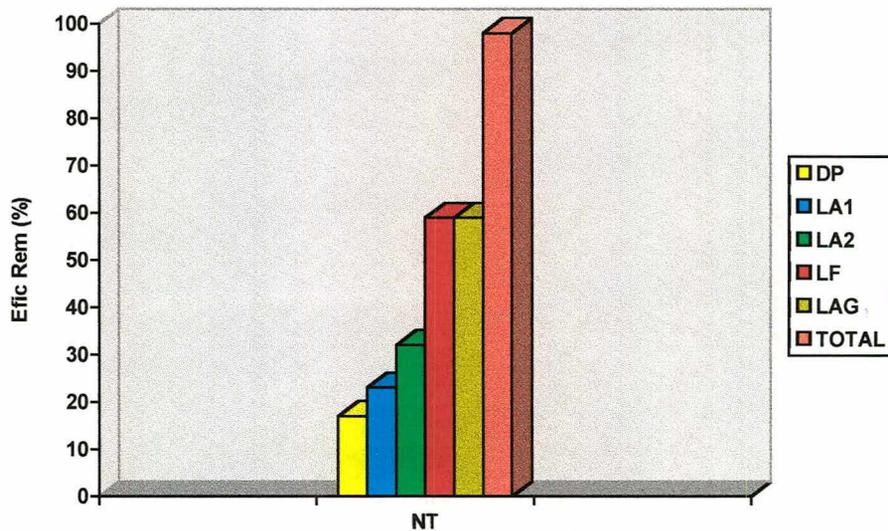


Fig. 4.8 - Eficiência de remoção do Nitrogênio total no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.

O decantador teve uma pequena participação na remoção do NT (17%), enquanto a eficiência do tratamento para a série de lagoas foi de aproximadamente 90%, passando a concentração de NT de 1.825 mg/l no afluente da lagoa LA1 para 173 mg/l no efluente da lagoa LAG, para um tempo de detenção hidráulica total de 125 dias.

Esse comportamento foi verificado através de estudos realizados por Costa et al (1995a) no sistema de tratamento de dejetos suínos, através de lagoas de estabilização mista (em série e em paralelo), em escala real, que encontraram redução acima de 99% para uma série de oito lagoas e com tempo de detenção total de 217 dias. Santos e Oliveira (1987), através de estudos em sistema de lagoas de estabilização em série, tratando esgoto doméstico, compreendendo uma lagoa anaeróbia com 3 m de profundidade e 1,7 dia de detenção, uma facultativa com 1,1 m de profundidade e 17,3 dias de detenção e uma de maturação com 1,1 m de profundidade e 9,7 dias de detenção, em Frielas, Portugal, encontraram remoção da ordem de 52,4% de nitrogênio amoniacal. Silva (1982) citado por Silva et al (1995), trabalhando com uma série de 5 lagoas de

estabilização, tratando esgoto sanitário, com 1,0 m de profundidade, sendo uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação, recebendo esgoto bruto com uma concentração de 45 mg/l de amônia, obteve remoção de 32, 48 e 81%, respectivamente, para um tempo de detenção hidráulica total de 8,5; 17,0 e 29,1 dias.

As lagoas anaeróbias LA1 e LA2 apresentaram baixas remoções do nitrogênio total (23 e 32%, respectivamente). As concentrações do NT caíram de 1.825 para 1.409 mg/l na lagoa LA1 e de 1.424 para 970 mg/l na lagoa LA2. Tais remoções são atribuídas principalmente pela sedimentação do nitrogênio orgânico em suspensão. De fato, pois a nitrificação biológica provavelmente não ocorreu, devido às condições de anaerobiose, e a carga hidráulica e o pH (predominante de baixos valores) não favoreceram à remoção da amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) através da volatilização para a atmosfera.

A lagoa facultativa apresentou valores do nitrogênio total afluente e efluente de 1.005 e 413 mg/l, respectivamente, uma eficiência de aproximadamente 59%, com um tempo de detenção de 24 dias. É possível que a principal causa de remoção deva-se à assimilação da amônia pelas algas. Pois essa lagoa, na maioria das vezes em que foi feita a análise de oxigênio dissolvido apresentou condições de anaerobiose, já que a matéria carbonácea ainda se encontrava muito alta, dificultando as condições necessárias para a remoção do nitrogênio através dos processos de nitrificação e desnitrificação. Além do mais, o pH (7,8) não se elevou suficientemente para favorecer a maior presença de amônia livre ( $\text{NH}_3$ ), no desprendimento para a atmosfera. De acordo com von Sperling (1996a), no pH próximo à neutralidade, praticamente toda a amônia se encontra na forma de  $\text{NH}_4^+$ . No pH próximo a 9,5, aproximadamente 50% da amônia está na forma de  $\text{NH}_3$  e 50% na forma de  $\text{NH}_4^+$ , em pH superior a 11, praticamente toda a amônia está na forma de  $\text{NH}_3$ .

Observou-se um desempenho semelhante das lagoas facultativa (LF) e de aguapés (LAG) na remoção do nitrogênio total, embora o tempo de detenção da LAG seja menor que o da LF.

As concentrações afluente e efluente da lagoa de aguapés foram de 420 e 173 mg/l, com uma redução de 59%. Não é provável que tenha ocorrido eliminação significativa do nitrogênio em

forma de gás, devido à predominante condição anaeróbica e ao baixo valor do pH (7,7) durante o período em estudo. Portanto, é possível que os aguapés tenham sido os principais removedores do nitrogênio (Bavaresco et al, 1996). Kawai e Grieco (1983) argumentam que a remoção de nutrientes na lagoa de aguapés é realizada, basicamente, por processos de absorção pelas plantas e sedimentação e/ou eliminação através da nitrificação e desnitrificação, no caso específico dos compostos nitrogenados. Entretanto, Ferrara e Avic (1982) argumentam que a nitrificação normalmente não ocorre em lagoas de estabilização, e Reed (1985) salienta que desnitrificação é apenas uma possibilidade teórica para a perda do nitrogênio permanente nas lagoas, e que a nitrificação e desnitrificação não é provavelmente o principal mecanismo para a remoção do nitrogênio em sistema de lagoas.

Como se verifica, os processos secundários e terciários envolvendo sistemas de lagoas de estabilização, como por exemplo, lagoas facultativas e de aguapés, são de grande importância para o completo tratamento dos dejetos suínos. As lagoas facultativas caracterizadas por apresentarem condições favoráveis ao desenvolvimento de algas, beneficiadas pela abundante presença de nutrientes ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{PO}_4^-$ ). Essas lagoas funcionam através das atividades fotossintéticas das algas sob a influência da luz solar e da ação das bactérias, no processo de oxidação da matéria orgânica.

De forma semelhante, Wolverton e MacDonald (1979) observaram que as lagoas de aguapés apresentam um desempenho atraente na remoção de nutrientes. Essa remoção é realizada, fundamentalmente, por processos de absorção pelas plantas, sedimentação e/ou volatilização para atmosfera através de nitrificação e desnitrificação. Além da capacidade de desenvolver uma biomassa capaz de estabilizar parte da matéria orgânica, e absorver outros poluentes, como partículas em suspensão, metais pesados, nutrientes, algas, sólidos em suspensão, microorganismos patogênicos, cor, turbidez e DBO.

Os valores dos coeficientes  $k$  do nitrogênio total para as lagoas LF e LAG foram determinados admitindo-se a taxa de degradação através da cinética de primeira ordem e utilizando-se o modelo de mistura completa. Tais valores foram obtidos através das concentrações médias do

NT na entrada e na saída e o tempo de detenção, obtendo-se 0,060 d<sup>-1</sup> para a lagoa LF e 0,074 d<sup>-1</sup> para a lagoa LAG, com temperaturas médias de 19,8 e 22,1 °C, respectivamente.

#### 4.2.5. Fósforo total

As concentrações médias obtidas para o Fósforo total ao longo do sistema experimental do CNPSA, de amostras coletadas semanalmente, são apresentadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. O valor médio de PT 633 mg/l no dejetos bruto de suínos caiu para 26 mg/l no efluente da lagoa de aguapés LAG, o que traduz uma redução de aproximadamente 96% (Tabelas 4.1 e 4.2). O decantador participou com um desempenho na faixa de 38% de remoção, uma vez que a concentração diminuiu de 633 mg/l no afluente para 391 mg/l no seu efluente. A redução na série de lagoas foi da ordem de 93%, para um tempo de detenção de 125 dias.

Essa tendência foi verificada para um sistema de lagoas de estabilização mista (em série e em paralelo), em escala real, tratando dejetos suínos, através de pesquisas no CNPSA, por Costa et al (1995a) que encontraram redução de 99% para uma série de oito lagoas, com tempo de detenção hidráulica total de 217 dias. Oliveira (1990), através de estudos efetuados em um sistema de lagoas de estabilização profundas em série, em escala piloto, sob diferentes configurações, tratando esgoto doméstico na Estação Experimental (EXTRABES), encontrou reduções de 18 e 6% do PT para o primeiro e segundo experimento, respectivamente, para uma série de cinco lagoas, sendo uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação, com tempo de detenção total de 25 e 40 dias.

A Figura 4.9 apresenta as eficiências de remoção do Fósforo total no decantador DP, nas lagoas LA1, LA2, LF e LAG e no total do sistema. O melhor desempenho na remoção do fósforo no sistema de lagoas do CNPSA foi observado na lagoa anaeróbia primária LA1, cujas concentrações médias do PT no afluente/efluente foram de 391 e 140 mg/l, respectivamente, correspondendo uma redução de 64%, para um tempo de detenção de 35 dias. Tal redução é atribuída, principalmente, a processos de sedimentação dos sólidos. Este fato também foi verificado por Livestock Industry Facilities & Environment (1995), o qual comenta que a

maioria dos compostos de fósforos estão contidos no fundo da lagoa devido à sedimentação dos sólidos. Costa et al (1995a) também constataram boas eficiências na remoção de PT nas lagoas anaeróbias LA1 e LA4, 87 e 42%, com tempo de detenção de 66,7 e 116,8 dias, respectivamente. No entanto, a maior remoção (87%) ocorreu para a lagoa com o menor tempo de detenção (66,7 dias). Ressalta-se, no entanto, que os tempos de detenção hidráulica dessas lagoas são 2 a 3,5 vezes superiores ao tempo de detenção da lagoa anaeróbia LA1 do sistema experimental de lagoas do CNPSA.

Este fato também foi observado por Oliveira (1990) em sua pesquisa na EXTRABES, o qual constatou que a maior remoção do PT ocorreu na lagoa anaeróbia.

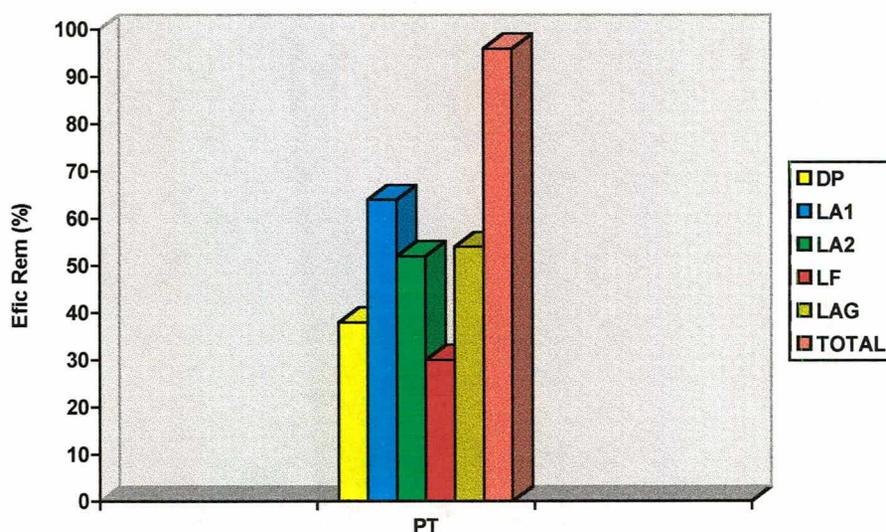


Fig. 4.9 - Eficiência de remoção do Fósforo total no decantador DP, nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, na lagoa de aguapés LAG e no total do sistema do CNPSA/EMBRAPA.

A concentração do fósforo total da lagoa anaeróbia LA2 caiu de 141 para 67 mg/l, com uma redução na faixa de 52%, para um tempo de detenção de 46 dias. Essas reduções ocorridas nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2 são atribuídas basicamente a processos de sedimentação dos

sólidos, uma vez que apresentaram valores médios de pH 7,4 e 7,7 bem abaixo do valor mínimo (8,2) referido por Toms et al (1975) para que ocorra a precipitação química do fosfato na forma de hidroxiapatita  $[Ca_5OH(PO_4)_3]$ . Von Sperling (1996a) argumenta que remoções mais significantes podem ocorrer através da precipitação dos fosfatos com pH acima de 8,0, enquanto Somiya e Fuji (1984) indicaram um valor do pH de 9,0 para iniciar a reação por precipitação, mas não concluíram que este mecanismo é o mais importante para remoção do fósforo nas lagoas, já que a remoção também é dependente do tempo de detenção.

A lagoa facultativa LF apresentou remoção de 30%, já que as concentrações afluente/efluente foram de 69 e 48 mg/l, respectivamente. Convém ressaltar, no entanto, que tal lagoa possui tempo de detenção hidráulica de 24 dias bem inferior ao tempo de detenção da lagoa anaeróbia LA2 (46 dias). Essa remoção pode ser atribuída à assimilação biológica pela biomassa das algas e bactérias e à precipitação química (Surampalli et al, 1995), embora o pH médio (7,8) encontrado na lagoa LF não se elevou o suficiente para uma remoção mais significativa por precipitação.

E por fim, a lagoa de aguapés ou jacinto d'água apresentou um bom desempenho na remoção do fósforo total na faixa de 54%, haja visto que o tempo de detenção foi de apenas 20 dias, inferior ao tempo de detenção das demais lagoas. É possível que as plantas (aguapés) tenham sido os principais removedores do PT, já que não havia tantas algas como na lagoa facultativa e o pH permaneceu baixo, 7,7, não sendo caracterizado como o ideal para a ocorrência da precipitação química. Kawai e Grieco (1983) salientam que os aguapés, além da capacidade assimiladora de nutrientes, removem de forma eficiente partículas em suspensão na água (algas, por exemplo) através da ação física do sistema de raízes. Por esse motivo, a lagoa de aguapés é um sistema atraente para tratamento avançado, quando o mesmo for utilizado combinado com a lagoa de estabilização, especialmente em regiões de climas quentes.

Comparando-se as Figuras 4.8 e 4.9 observa-se que as remoções do Nitrogênio e do Fósforo ocorreram de maneira diferente nas lagoas de estabilização anaeróbias e facultativa, pois enquanto o nitrogênio foi removido principalmente na lagoa facultativa e de aguapés por assimilação da amônia pelas algas e pelas raízes das plantas, o fósforo foi removido com maior

intensidade na lagoa anaeróbia LA1 por sedimentação do fosfato. A remoção do fósforo na lagoa LF não foi tão acentuada, por apresentar um pH abaixo de 8,0, não favorecendo uma remoção mais intensa por precipitação.

#### 4.2.6. Variações sazonais na lagoa de aguapés

A seguir, são apresentados os resultados observados no monitoramento da lagoa de aguapés do sistema da UNETDS funcionando em fluxo contínuo, em duas épocas climáticas diferentes: de outubro/96 a fevereiro/97 (primavera/verão) e de maio a agosto/97 (outono/inverno). As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram os valores médios obtidos para as leituras semanais dos parâmetros analisados.

Tabela 4.5 - Valores médios obtidos com a lagoa de aguapés no período de outubro/96 a fevereiro de 1997 no CNPSA.

|             | <b>pH</b> | <b>ST<br/>mg/l</b> | <b>SF<br/>mg/l</b> | <b>SV<br/>mg/l</b> | <b>DQO<br/>mg/l</b> | <b>DBO<br/>mg/l</b> | <b>NT<br/>mg/l</b> | <b>PT<br/>mg/l</b> |
|-------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Afluente    | 7,8       | 2.244              | 1.345              | 899                | 821                 | 428                 | 362                | 49                 |
| Efluente    | 7,8       | 1.334              | 731                | 603                | 377                 | 209                 | 178                | 26                 |
| Rem.<br>(%) |           | 40                 | 46                 | 33                 | 54                  | 51                  | 51                 | 46                 |

Temperatura média 24,7 °C

Tabela 4.6 - Valores médios obtidos com a lagoa de aguapés no período de maio a agosto de 1997 no CNPSA.

|             | <b>pH</b> | <b>ST<br/>mg/l</b> | <b>SF<br/>mg/l</b> | <b>SV<br/>mg/l</b> | <b>DQO<br/>mg/l</b> | <b>DBO<br/>mg/l</b> | <b>NT<br/>mg/l</b> | <b>PT<br/>mg/l</b> |
|-------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| Afluente    | 7,7       | 2.825              | 1.677              | 1.148              | 883                 | 485                 | 494                | 64                 |
| Efluente    | 7,4       | 1.303              | 834                | 468                | 317                 | 217                 | 167                | 26                 |
| Rem.<br>(%) |           | 54                 | 50                 | 59                 | 64                  | 55                  | 66                 | 59                 |

Temperatura média 17,5 °C

As Tabelas 4.5 e 4.6 mostram que os dejetos, mesmo após passarem por tratamentos primários (decantador) e secundários (lagoas anaeróbias e facultativa), chegam à lagoa de aguapés ainda com elevadas concentrações de sólidos (ST, SF, SV), de matéria orgânica (DBO, DQO) e de nutrientes (NT, PT). A utilização dessas lagoas para tratamento doméstico tem sido objeto de polêmica em razão da baixa eficiência de remoção em termos de matéria orgânica, além dos problemas básicos na implantação desse sistema que é representado pela remoção e disposição final dos aguapés, assim como da proliferação de mosquitos. Porém, o uso de lagoas de aguapés, como alternativa de tratamento terciário, implantada no CNPSA/EMBRAPA, para esses dejetos tem demonstrado bons resultados na remoção do nitrogênio total, do fósforo total e até mesmo da matéria orgânica. Essas plantas podem servir na complementação da dieta dos animais, contudo, faz-se necessário uma investigação mais detalhada das possibilidades e limitações do uso das mesmas como fonte alimentar ou complemento nutricional dos suínos.

A Tabela 4.7 a seguir apresenta as eficiências de remoção do Nitrogênio e do Fósforo nas duas épocas climáticas estudadas.

Tabela 4.7 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés em duas épocas climáticas distintas.

|            | PRIMAVERA/VERÃO            |     |     |     |     | OUTONO/INVERNO             |     |     |     |   |
|------------|----------------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----|---|
|            | M                          | E   | S   | E   | S   | M                          | E   | S   | E   | S |
|            | Out                        | Nov | Dez | Jan | Fev | Mai                        | Jun | Jul | Ago |   |
| Nitrogênio | 45                         | 51  | 50  | 47  | 79  | 70                         | 59  | 66  | 73  |   |
| Fósforo    | 50                         | 46  | 48  | 51  | 19  | 60                         | 58  | 62  | 63  |   |
|            | Temperatura média 24,7 ° C |     |     |     |     | Temperatura média 17,5 ° C |     |     |     |   |

O comportamento do Nitrogênio e do Fósforo nas duas épocas de monitoramento da lagoa de aguapés pode ser verificado nas Figuras 4.10 e 4.11, respectivamente.

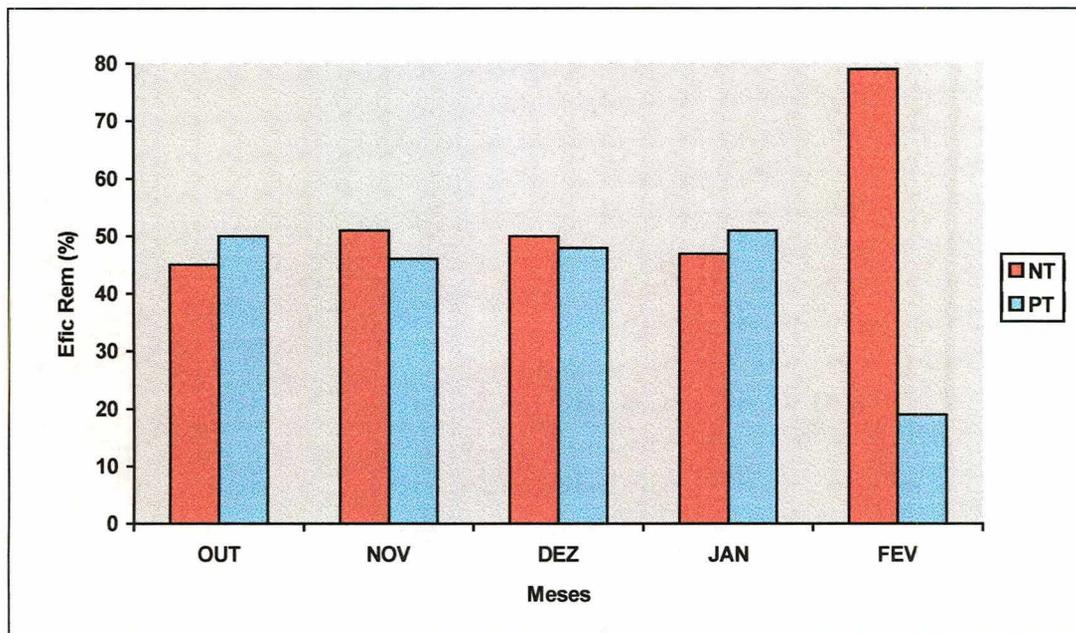


Fig. 4.10 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés do CNPSA na época primavera/verão.

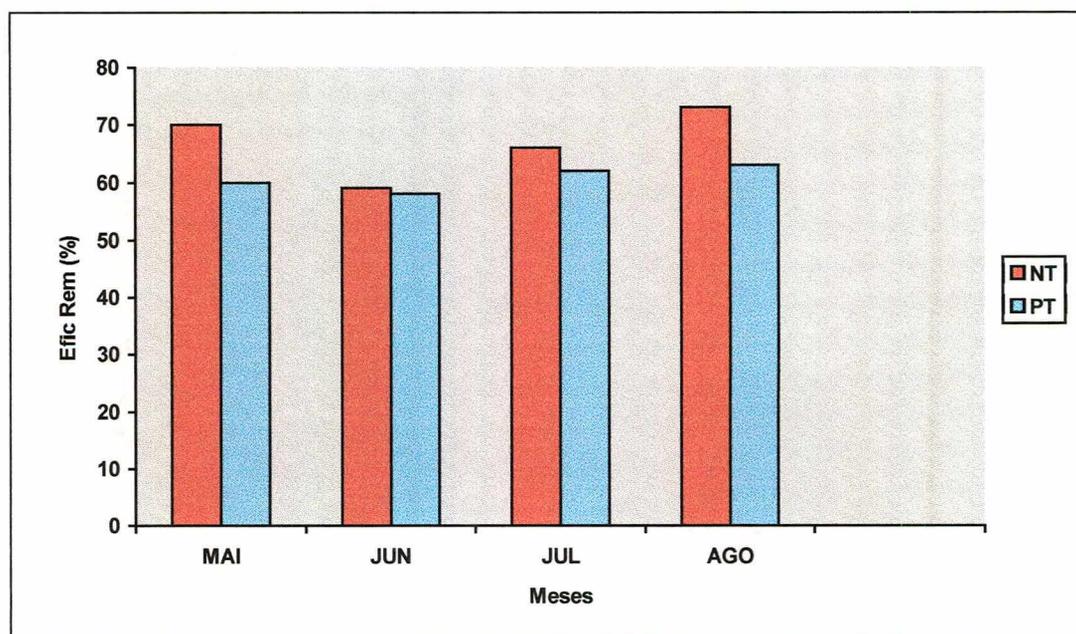


Fig. 4.11 - Eficiência de remoção do Nitrogênio e do Fósforo na lagoa de aguapés do CNPSA na época outono/inverno.

Observa-se que a lagoa de aguapés teve melhor rendimento no período de maio a agosto/97 do que no período de outubro/96 a fevereiro/97. Ou seja, trabalhou com maior eficiência nas estações outono/inverno ( $TM = 17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) do que nas estações primavera/verão ( $TM = 24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Uma das causas deve-se ao manejo das plantas, já que na época quente o excedente foi retirado da lagoa somente a cada 2 ou 3 meses, contrariando as recomendações de limpeza a cada 30 dias no máximo, uma vez que as plantas necessitam de um espaço livre para crescer, caso contrário sua produtividade diminui e, conseqüentemente, a eficácia no tratamento dos dejetos. Na época fria o excedente foi retirado mensalmente. Outra causa citada por Costa et al (1997b), é que as taxas diárias de absorção apresentam-se mais elevadas no inverno do que no verão, provavelmente devido às condições de temperatura menores, que reduzem as taxas de reações químicas e inibem o metabolismo bacteriano do meio líquido, fazendo com que os aguapés sejam os principais removedores da poluição nas condições de inverno, “trabalhando” mais que no verão.

Entretanto, em lagoas de aguapés, para se ter um tratamento adequado, deve-se levar em conta alguns pré requisitos. Por exemplo, os autores Kawai e Grieco (1983), em pesquisas realizadas para esgoto doméstico, em escala piloto, no período de 1981/1982 no Estado de São Paulo, argumentam que as cargas máximas de nitrogênio e de fósforo aplicáveis na lagoa de aguapés, para se manter 80% da eficiência do tratamento, foram avaliadas em 18 kg/ha/d e 4 kg/ha/d, respectivamente. Os autores aplicaram diferentes cargas de nitrogênio e de fósforo total, sob diferentes tempos de detenção nas lagoas experimentais. De modo geral, as eficiências de remoção do NT e do PT apresentam uma tendência de melhoria com o aumento do tempo de detenção. As máximas eficiências de remoção obtidas foram de 52% de NT e de 58% de PT, com um tempo de detenção de dez dias, no período de dezembro e janeiro, cujas cargas aplicadas foram de 23,3 kgNT/ha/dia e de 4,0 kgPT/ha/dia, e eficiências mínimas de 12% de NT e 14% de PT, com tempo de detenção de 2,5 dias nos meses de abril e maio, com cargas aplicadas de 79,2 kgNT/ha/dia e 18,7 kg/ha/dia. Além disso, comentam que a melhor proporção de área ocupada pelos aguapés, no estudo, foi de 70%. Em nossa pesquisa, essas cargas foram, em média, de 170 kgNT/ha/dia e 22 kgPT/ha/dia. Como se verifica, a carga aplicada do NT no CNPSA/EMBRAPA esteve bem acima da utilizada por Kawai e Grieco, no

entanto, a eficiência de remoção foi superior a 50% tanto para o NT quanto para o PT, possivelmente em decorrência do tempo de detenção (20 dias).

#### 4.2.7. Coliformes fecais

Os valores médios e as variações mínimas e máximas (afluente e efluente) observados para os Coliformes Fecais no sistema experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Valores médios e variações mínimas e máximas obtidos de Coliformes Fecais no afluente e efluente das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA.

|                           |        | L A G O A S |       |       |       |
|---------------------------|--------|-------------|-------|-------|-------|
|                           |        | LA1         | LA2   | LF    | LAG   |
| Afluente<br>(NMP/100 ml): | médio  | 2,1E10      | 4,7E7 | 4,7E5 | 1,5E4 |
|                           | mínimo | 1,0E7       | 6,6E5 | 1,0E3 | 3,6E2 |
|                           | máximo | 2,3E11      | 2,3E8 | 4,9E6 | 6,4E4 |
| Efluente<br>(NMP/100 ml): | médio  | 4,9E7       | 4,7E5 | 1,5E4 | 3,7E3 |
|                           | mínimo | 6,0E5       | 1,0E3 | 1,1E2 | 2,2E2 |
|                           | máximo | 2,3E8       | 4,9E6 | 7,1E4 | 1,3E4 |

Os CF caíram de 2,1E10 NMP/100 ml no afluente da lagoa LA1 para 3,7E3 NMP/100 ml no efluente da lagoa LAG, implicando numa remoção de 99,99998% para a série de lagoas, com um tempo de detenção hidráulica total de 125 dias. Durante o experimento, as porcentagens de remoção foram em torno de 99,8; 99,0; 96,8 e 75,3% respectivamente para as lagoas LA1, LA2, LF e LAG. Os resultados das concentrações de CF transformados para log do afluente e do efluente das lagoas anaeróbias, facultativa e de aguapés são apresentados na Figura 4.12.

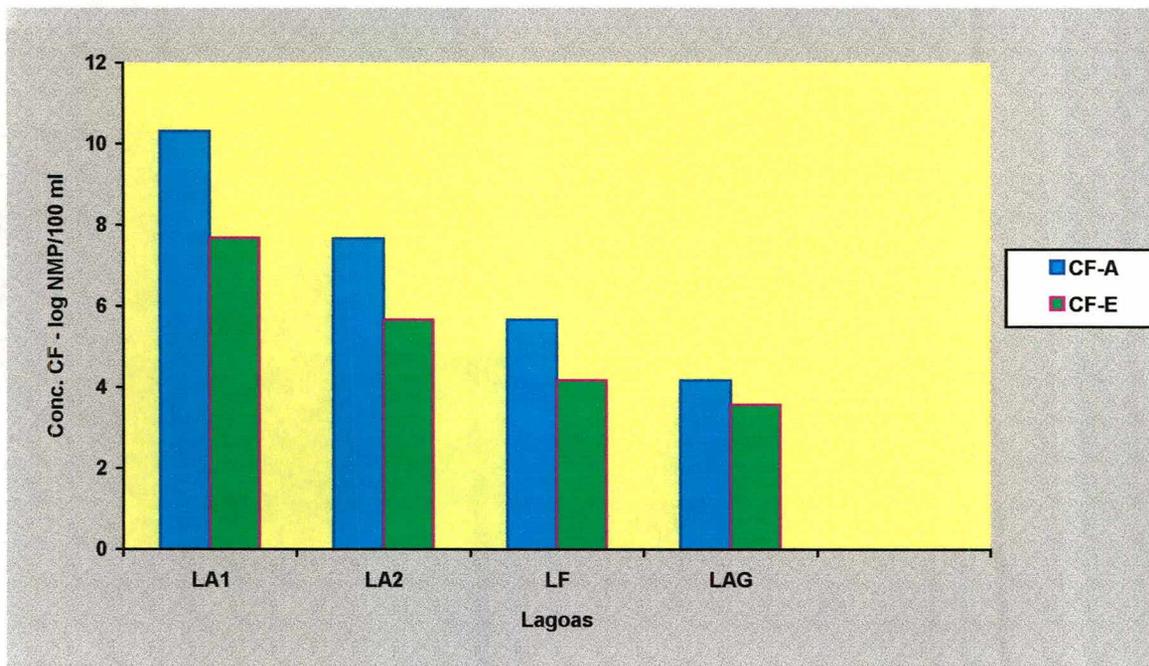


Fig. 4.12 - Concentrações do afluente e do efluente do log do número de Coliformes Fecais por 100 ml das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG, no período de operação de maio/96 a agosto/97.

O sistema experimental de lagoas do CNPSA/EMBRAPA apresentou um bom desempenho, obtendo-se um efluente com NMP de CF em torno de  $3,7 \times 10^3/100$  ml, pouco acima das condições exigidas pela Legislação Ambiental de Santa Catarina ( $< 1000$  CF/100ml), para o lançamento nos corpos de água receptores de classe 2.

O valor médio encontrado para a constante de mortandade ( $k_b$ ) de CF para a série de lagoas (LA1, LA2, LF e LAG), admitindo-se cada lagoa funcionando com cinética de primeira ordem e regime de mistura completa, foi de  $1,6 \text{ d}^{-1}$ , para um tempo de detenção total de 125 dias. Este valor é próximo aos determinados por Oliveira et al (1995x),  $1,94$  e  $1,62 \text{ d}^{-1}$ , primeiro e segundo experimento, respectivamente, em um sistema na EXTRABES, consistindo de 10 lagoas em série (uma anaeróbia, uma facultativa e oito de maturação) com 1,5 m de profundidade, para esgoto doméstico, em escala piloto, e com tempo de detenção total de 19 e

28,5 dias, respectivamente. Do mesmo modo, Oliveira (1990), em estudos de lagoas de estabilização profundas (2,20 m) de resíduos domésticos na EXTRABES obteve valores de  $k_b$  igual a  $0,81 \text{ d}^{-1}$  e  $1,06 \text{ d}^{-1}$ , para um sistema de cinco lagoas, em série (uma anaeróbia, uma facultativa e três de maturação), com um tempo de detenção hidráulica total de 25 e 40 dias, respectivamente, e com remoção de 99,975% e 99,999%.

Apesar das remoções dos coliformes fecais nas lagoas anaeróbias e facultativa terem sido de certa maneira próximas, o valor da constante de mortandade  $K_b$  da lagoa LA1 foi bem mais elevado do que o da lagoa LF. Isto, por um lado, contraria uma grande parte dos pesquisadores da área, pois os mecanismos de remoção de CF são complexos, mas eles dependem do alto pH (Pearson et al, 1987), da penetração da luz (Moeller e Calkins, 1980) e da alta concentração de oxigênio dissolvido (Curtis, 1990, citado por Curtis et al, 1992b). Esses, em geral, são características das lagoas facultativas secundárias e, de uma forma otimizada, das lagoas de maturação. Von Sperling (1996b) ressalta a existência de diversos fatores que contribuem para a mortandade de coliformes, como temperatura, insolação, pH, escassez de alimento, organismos predadores, competição e compostos tóxicos, e estes mecanismos se tornam mais efetivos com menores profundidades das lagoas.

Por outro lado, os resultados obtidos no CNPSA estão de acordo com os encontrados por Mills et al (1992) que, em pesquisas desenvolvidas em sete sistemas de lagoas de estabilização, em escala real, no Kenya, sob diferentes tipos e disposições, tais como: anaeróbias, facultativas primárias, facultativas secundárias e de maturação, encontraram baixas taxas de remoção de CF, principalmente para as lagoas de maturação em todos os sistemas amostrados. Os valores de  $k_b$  mais altos para as lagoas primárias do que para as lagoas de maturação também têm sido observados em outros sistemas (Oragui et al, 1987), e provavelmente se deve à grande porcentagem de remoção através da sedimentação dos sólidos. Mills et al (1992) argumentam porém, que os baixos valores de  $k_b$  na série de lagoas poderiam ser explicados pelos baixos valores nas lagoas anaeróbias e facultativas primárias, visto que as taxas de remoção das lagoas de maturação são normalmente mais elevadas. Contrariamente, portanto, verificaram que as taxas de remoção mais altas foram das lagoas primárias, com as lagoas de maturação mostrando baixas remoções, e concluíram que isto ocorre devido a dois fatores fundamentais:

a) uma grande porcentagem da população de CF afluyente sendo removida por sedimentação dos sólidos na primeira lagoa; e/ou

b) os CF remanescentes nas lagoas de maturação sendo, de fato, os sobreviventes mais resistentes da população original.

Na Tabela 4.9 são apresentadas as cargas aplicadas superficial e volumétrica de Coliformes Fecais em todas as lagoas, no período de monitoramento de maio/96 a agosto/97, bem como as remoções correspondentes.

Tabela 4.9 - Cargas superficial e volumétrica (aplicadas e removidas) de Coliformes Fecais para o sistema de lagoas do CNPSA/EMBRAPA, no período de maio/96 a agosto/97.

| LAGOA | Carga superficial (NMPCF/ha/d) |            | Carga volumétrica (NMPCF/m <sup>3</sup> /d) |            |
|-------|--------------------------------|------------|---|------------|
|       | aplicada                       | - removida | aplicada                                    | - removida |
| LA1   | 1,020E17                       | 1,018E17   | 6,000E12                                    | 5,986E12   |
| LA2   | 2,248E14                       | 2,225E14   | 1,022E10                                    | 1,011E10   |
| LF    | 1,665E12                       | 1,615E12   | 1,958E8                                     | 1,900E8    |
| LAG   | 6,000E10                       | 4,520E10   | 7,500E6                                     | 5,650E6    |

Observa-se que as cargas superficial e volumétrica aplicadas (Tabela 4.9) nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG tiveram elevadas remoções, evidenciando que sistema de lagoas de estabilização apresenta um excelente desempenho quanto à eficácia na remoção de Coliformes Fecais.

#### 4.2.8. pH

Os valores do pH dos dejetos brutos (afluyente do decantador) estiveram próximos da faixa da neutralidade, tendo um valor mínimo de 6,1 e máximo de 7,9. A Tabela 4.10 apresenta os resultados médios e suas variações mínimas e máximas (afluyente e efluyente) obtidos no sistema de tratamento da unidade experimental UNETDS do CNPSA/EMBRAPA, e a Figura 4.13 apresenta o comportamento deste parâmetro para o decantador (dejeito bruto) e para as lagoas

LA1, LA2, LF e LAG, durante o período de monitoramento, cujos dados estão nas Tabelas III.1 - III.5, anexo III.

Tabela 4.10 - Valores médios e variações mínimas e máximas, obtidos para o pH no afluente e efluente do decantador e das lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA.

|           |        | L A G O A S |     |     |     |     |
|-----------|--------|-------------|-----|-----|-----|-----|
|           |        | DP          | LA1 | LA2 | LF  | LAG |
| Afluente: | médio  | 6,9         | 7,0 | 7,4 | 7,7 | 7,8 |
|           | mínimo | 6,1         | 6,2 | 6,7 | 6,7 | 6,8 |
|           | máximo | 7,9         | 7,9 | 7,9 | 8,3 | 8,4 |
| Efluente: | médio  | 7,0         | 7,4 | 7,7 | 7,8 | 7,7 |
|           | mínimo | 6,2         | 6,8 | 6,7 | 6,8 | 6,7 |
|           | máximo | 7,9         | 8,1 | 8,3 | 8,4 | 8,9 |

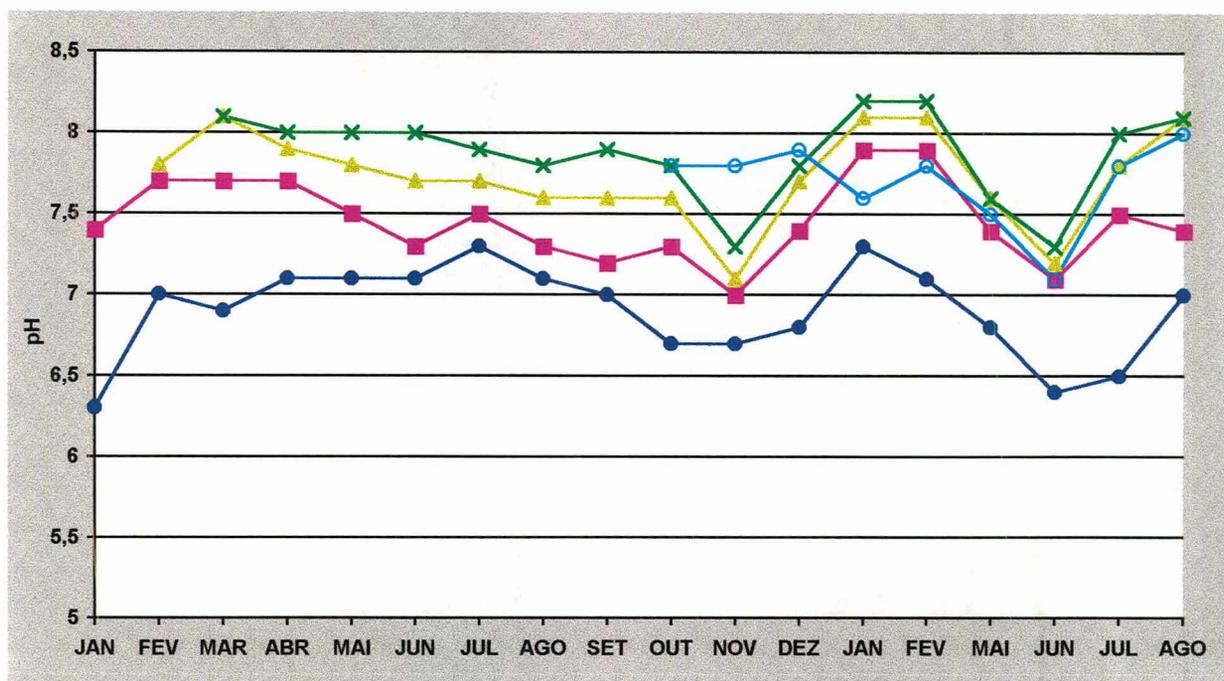


Fig. 4.13 - Variações mensais médias do pH: (O) dejetos brutos e (□) lagoa anaeróbia LA1 no período de janeiro/96 a agosto/97, (Δ) lagoa anaeróbia LA2 no período de fevereiro/96 a agosto/97, (x) lagoa facultativa LF no período de março/96 a agosto/97 e (o) lagoa de aguapés LAG no período de outubro/96 a agosto/97.

Observa-se que os valores médios do pH dos efluentes do decantador e das lagoas oscilaram razoavelmente. O pH (valor médio) subiu de 6,9 no dejetto bruto para um máximo de 7,8 no efluente da lagoa LF e 7,7 no efluente da lagoa LAG (Tabelas 4.10). Também nota-se que os valores do pH são mais baixos nas lagoas anaeróbias em relação às outras lagoas, associados com as condições de anaerobioses, devido às cargas orgânicas mais altas nas primeiras lagoas.

#### 4.2.9. Temperatura

A temperatura é um fator importante no desempenho de um sistema de lagoas de estabilização, uma vez que a atividade biológica responde com maior intensidade no verão do que no inverno, assim como no período quente as taxas de radiação solar são mais acentuadas, favorecendo o crescimento fitoplantônico, que, juntamente com a atividade metabólica dos microorganismos presentes na massa líquida da água, promovem a oxidação da matéria orgânica. Além da matéria orgânica, a remoção de outros parâmetros também está ligada com a temperatura, como por exemplo, o nitrogênio amoniacal. Este, por sua vez, é desprendido para a atmosfera através da fotossíntese que ocorre nas lagoas facultativas, a qual é contribuída para a elevação do pH por retirar do meio líquido a acidez carbônica.

Durante o desenvolvimento da pesquisa no sistema experimental UNETDS do CNPSA, a temperatura teve grandes oscilações, com valores mínimo de 6,5 °C na lagoa LF ocorrida no mês de julho de 1996 e máximo de 32,5 °C na lagoa LA2 no mês de janeiro de 1997 (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Valores médios e variações mínimas e máximas, obtidos para a temperatura nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, facultativa LF e de aguapés LAG do CNPSA.

|           |        | L A G O A S |      |      |      |
|-----------|--------|-------------|------|------|------|
|           |        | LA1         | LA2  | LF   | LAG  |
| Afluente: | médio  | 21,6        | 20,6 | 19,8 | 22,1 |
| ( ° C)    | mínimo | 7,0         | 7,0  | 6,5  | 14,0 |
|           | máximo | 32,0        | 32,5 | 29,8 | 29,5 |

As temperaturas médias nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2 e na facultativa LF tiveram uma estreita variação, entre 19,8 e 21,6 °C (Tabela 4.11), mesmo não coincidindo o início da amostragem das mesmas. A Figura 4.14 apresenta as temperaturas médias dessas lagoas e do ambiente durante o período do estudo. Na lagoa de aguapés LAG, a temperatura média foi mais elevada em decorrência do período inicial de operação da mesma (22,1 °C).

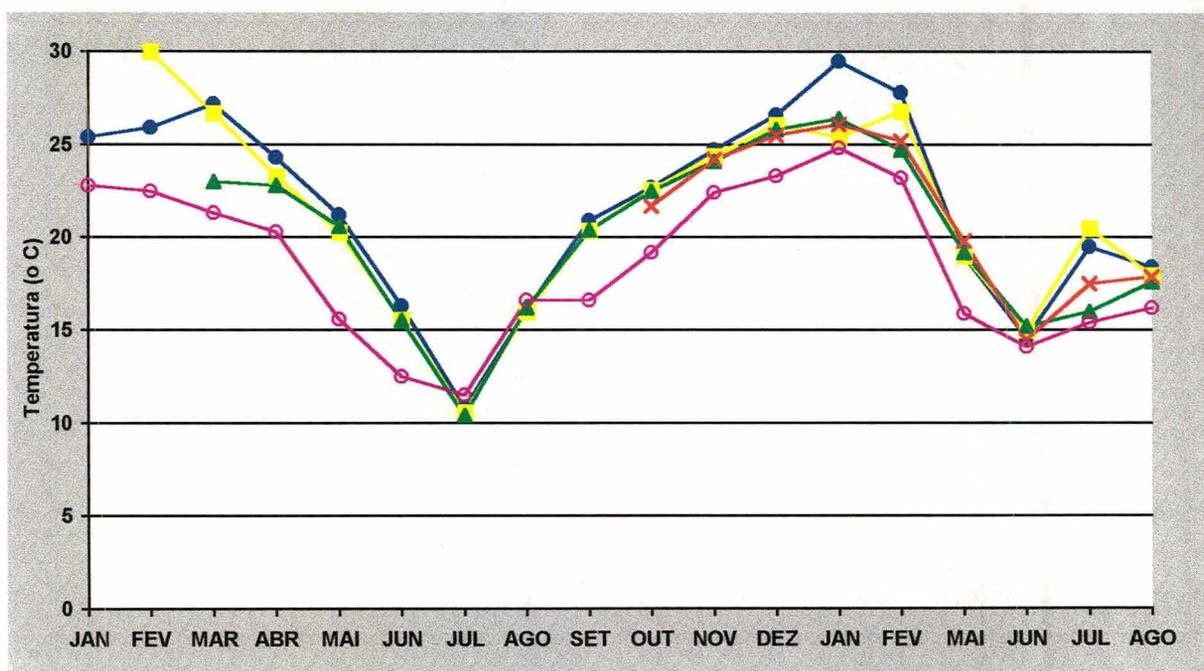


Fig. 4.14- Variações mensais médias da temperatura: (O) do ambiente e (●) da lagoa anaeróbia LA1 no período de janeiro/96 a agosto/97, (□) da lagoa anaeróbia LA2 no período fevereiro/96 a agosto/97, (Δ) da lagoa facultativa LF no período de março/96 a agosto/97 e (x) da lagoa de aguapés LAG no período de outubro/96 a agosto/97.

#### 4.2.10. Dados climatológicos

Com a finalidade de avaliar a influência das variações climáticas no desempenho do sistema de lagoas de estabilização em estudo do CNPSA, foram registradas as temperaturas médias mensais (max, min, med), assim como a amplitude diária, as umidades relativas médias mensais (max, min, med), a velocidade e a direção do vento e a taxa de insolação quantificada através do número de horas sol/dia. Estes valores estão apresentados na Tabela (4.12).

Tabela 4.12 - Dados climatológicos obtidos na Estação Agrometeorológica da EMBRAPA do Centro Nacional de Pesquisa de Suínos e Aves - CNPSA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| Mês/ano | Temp. (° C) |      |      | Amplitude | Umid. Relat. (%) |      |      | Ventilação |     | Insolação<br>horas/dia |
|---------|-------------|------|------|-----------|------------------|------|------|------------|-----|------------------------|
|         | xMax        | xMin | xMed |           | Max              | Min  | Med  | v (m/s)    | Dir |                        |
| JAN/96  | 28,0        | 16,6 | 22,8 | 11,4      | 83,7             | 59,0 | 75,4 | 1,45       | SE  | 5:48                   |
| FEV/96  | 27,8        | 17,5 | 22,5 | 10,4      | 85,5             | 64,6 | 77,8 | 1,45       | SE  | 6:43                   |
| MAR/96  | 25,5        | 19,9 | 21,6 | 5,6       | 87,4             | 62,6 | 79,6 | 1,33       | SE  | 5:28                   |
| ABR/96  | 24,2        | 18,3 | 20,3 | 5,9       | 88,5             | 58,3 | 77,1 | 1,44       | SE  | 6:19                   |
| MAI/96  | 20,8        | 13,0 | 15,6 | 7,9       | 91,0             | 55,8 | 78,0 | 1,05       | SE  | 5:05                   |
| JUN/96  | 16,0        | 10,1 | 12,5 | 5,9       | 90,6             | 61,6 | 81,2 | 1,28       | NE  | 3:41                   |
| JUJ/96  | 16,2        | 8,6  | 11,5 | 7,6       | 87,8             | 61,2 | 76,4 | 1,20       | SE  | 5:22                   |
| AGO/96  | 21,7        | 12,8 | 16,6 | 8,9       | 85,0             | 50,8 | 72,5 | 1,29       | SE  | 6:01                   |
| SET/96  | 21,1        | 14,1 | 16,6 | 7,0       | 83,1             | 58,4 | 73,0 | 1,54       | SE  | 6:11                   |
| OUT/96  | 23,7        | 16,2 | 19,2 | 7,5       | 84,8             | 55,9 | 75,8 | 1,43       | SE  | 4:19                   |
| NOV/96  | 27,2        | 19,1 | 22,4 | 8,1       | 77,1             | 56,0 | 69,5 | 1,60       | E   | 7:10                   |
| DEZ/96  | 28,1        | 20,3 | 23,3 | 7,8       | 84,9             | 57,2 | 72,9 | 1,25       | N   | 4:42                   |
| JAN/97  | 29,7        | 21,6 | 24,8 | 8,1       | 77,9             | 52,5 | 69,6 | 1,42       | NE  | 6:47                   |
| FEV/97  | 27,9        | 20,6 | 23,2 | 7,3       | 88,3             | 64,2 | 80,9 | 1,36       | S   | 5:13                   |
| MAR/97  | 27,0        | 17,7 | 21,5 | 9,3       | 84,9             | 51,9 | 73,8 | 1,13       | S   | 7:57                   |
| ABR/97  | 25,4        | 14,5 | 18,6 | 10,9      | 85,4             | 49,1 | 70,7 | 1,43       | N   | 7:27                   |
| MAI/97  | 22,5        | 12,2 | 15,9 | 10,3      | 89,6             | 53,1 | 75,6 | 1,34       | NE  | 6:11                   |
| JUN/97  | 18,6        | 11,3 | 14,1 | 7,2       | 85,3             | 63,4 | 77,5 | 1,78       | NW  | 3:50                   |
| JUJ/97  | 19,0        | 12,0 | 15,4 | 7,8       | 90,2             | 59,8 | 78,1 | 1,18       | N   | 4:42                   |
| AGO/97  | 21,1        | 13,0 | 16,2 | 8,1       | 87,1             | 57,0 | 75,5 | 1,42       | N   | 5:35                   |

Fonte: CNPSA/EMBRAPA (1996-1997)

Os dados observados da Estação Agrometeorológica do CNPSA, situada cerca de 500 m da unidade experimental -UNETDS, durante o desenvolvimento de toda a pesquisa (janeiro/96 a agosto/97), mostraram amplas oscilações térmicas, onde as temperaturas médias ficaram em torno de 18,7 °C, com máximas acima de 34,5 °C, e mínimas inferior a 0 (zero) °C, no ano de 1996. Para o ano de 1997, até o final do experimento, ou seja, até o mês de agosto, essas temperaturas tiveram os seguintes valores: a temperatura média foi de 19,7 °C, com máxima acima de 35 °C e mínima abaixo de -1,4 °C. Esta baixa temperatura ambiente ocorrida na estação do inverno certamente influencia a temperatura da massa líquida das lagoas, acarretando uma diminuição na atividade metabólica dos microorganismos. A Figura 4.15 descreve as curvas definidas pelas variações das temperaturas ambientes máximas, mínimas e médias.

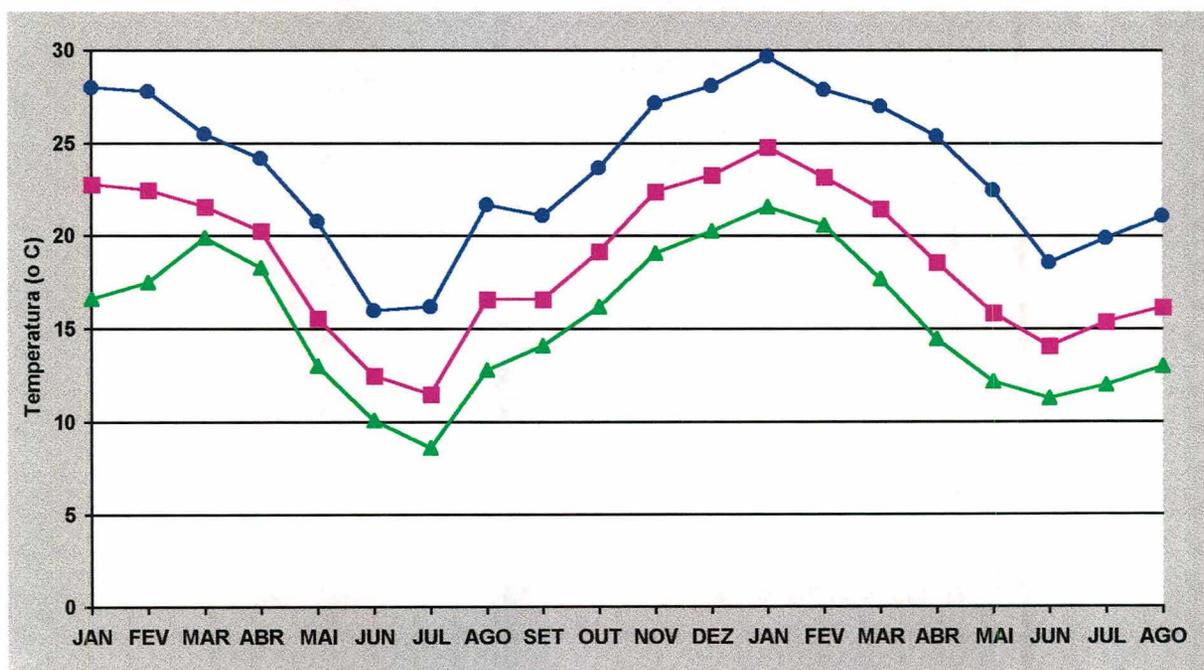


Fig. 4.15 - Variações mensais médias das temperaturas ambientes: (O) máximas (□) médias e (Δ) mínimas, registradas no período de janeiro/96 a agosto/97, na Estação Agrometeorológica do CNPSA/EMBRAPA.

#### 4.2.11. Regime de fluxo hidráulico das lagoas

Objetivando-se avaliar a evolução dos parâmetros ao longo das lagoas, assim como o regime de fluxo hidráulico pertencente as mesmas, foram efetuadas coletas no afluente e efluente de cada lagoa e ao longo do fluxo delas, como descrito no item 3.2.4.

As amostras ao longo do fluxo das lagoas foram coletadas semanalmente, exceto para a análise da DQO, feita duas vezes por semana. Os resultados médios estão apresentados nas Tabelas I.2 - I.5, anexo I. As Figuras 4.16 e 4.19 mostram a evolução da DBO, DQO e ST ao longo das lagoas LA1 e LAG, respectivamente, e as Figuras 4.17 e 4.18 apresentam a evolução da DQO e ST ao longo das lagoas LA2 e LF, respectivamente.

Como o sistema de lagoas do CNPSA foi disposto em série, cada unidade teve seu início de operação diferenciado, como descrito no item 3.2.3. O experimento da lagoa LA1 foi iniciado no mês de janeiro/96, da lagoa LA2 em fevereiro/96 e da lagoa LF em março/96, após uma fase inicial para a entrada de regime de funcionamento permanente. Essas lagoas foram monitoradas ao longo do seu fluxo até o mês de outubro/96. Quanto à lagoa LAG, o experimento foi realizado de outubro/96 a fevereiro/97.

Os resultados obtidos (Tabelas I.2 - I.5, anexo I, e as Figuras 4.16 a 4.19), referentes às lagoas anaeróbias, facultativa e de aguapés, mostram que entre os dois regimes extremos existentes de fluxos idealizados: fluxo em pistão e mistura completa, o modelo mais adequado para esse tipo de resíduo orgânico é o de *mistura completa*. Isto por não ter uma maior concentração de matéria orgânica (DBO, DQO) próxima à entrada da lagoa, onde a taxa de remoção seria mais elevada neste ponto, e daí uma degradação seqüencial ao longo dela, mas por possibilitar uma dispersão dos despejos por todo a lagoa, fazendo com que a concentração da água residuária ao entrar na mesma seja logo igualada à concentração do efluente, apesar das configurações geométricas das lagoas (Tabela 3.1) com relação comprimento/largura variando de 1,5/1 para as lagoas LA1 e LA2, de 2,5/1 para a lagoa LF e de 6,2/1 para a lagoa LAG, contrariando uma grande parte de pesquisadores da área.

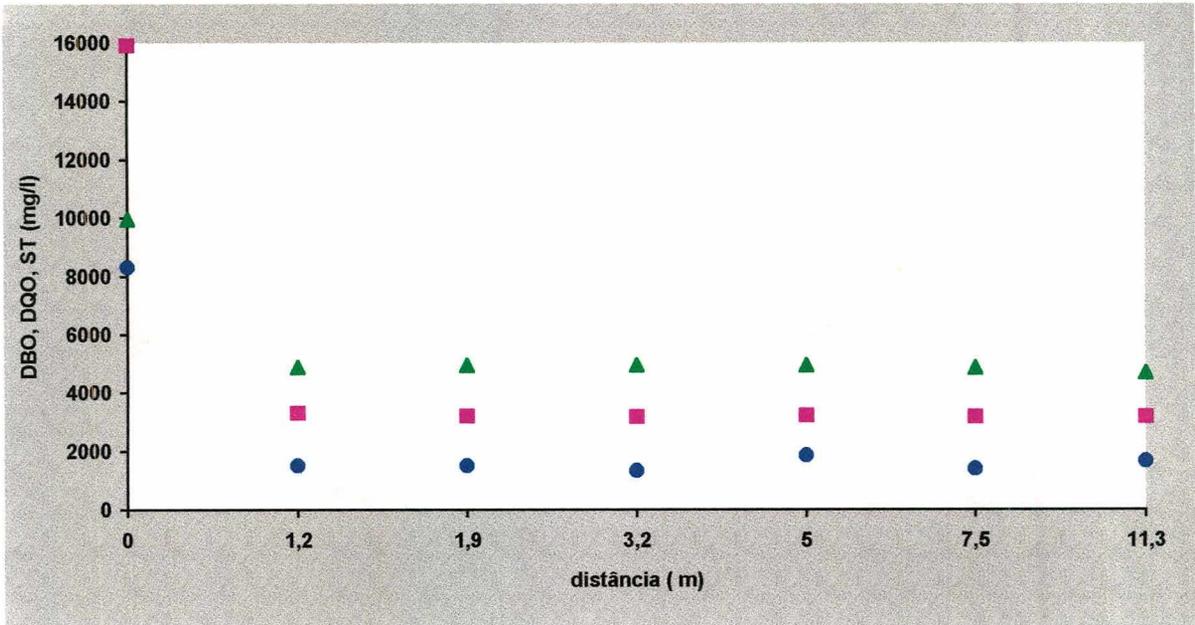


Fig. 4.16 - Evolução dos parâmetros: ( O ) DBO, ( □ ) DQO e ( Δ ) ST ao longo da lagoa anaeróbia LA1 do CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro/96.

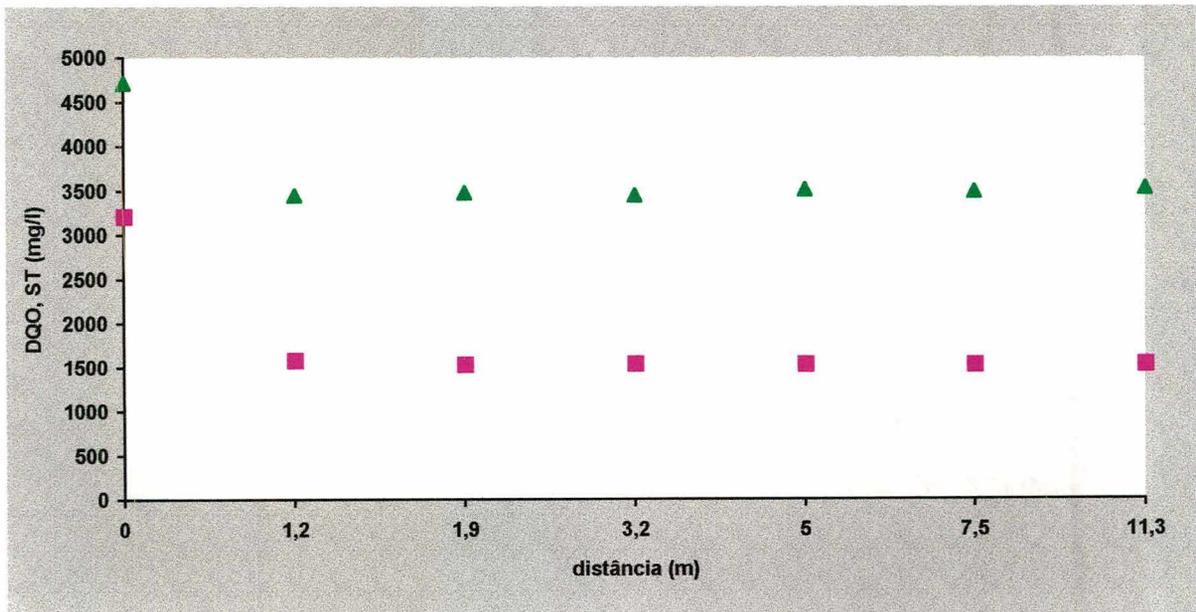


Fig. 4.17 - Evolução dos parâmetros: ( □ ) DQO e ( Δ ) ST ao longo da lagoa anaeróbia LA2 do CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro a outubro/96.

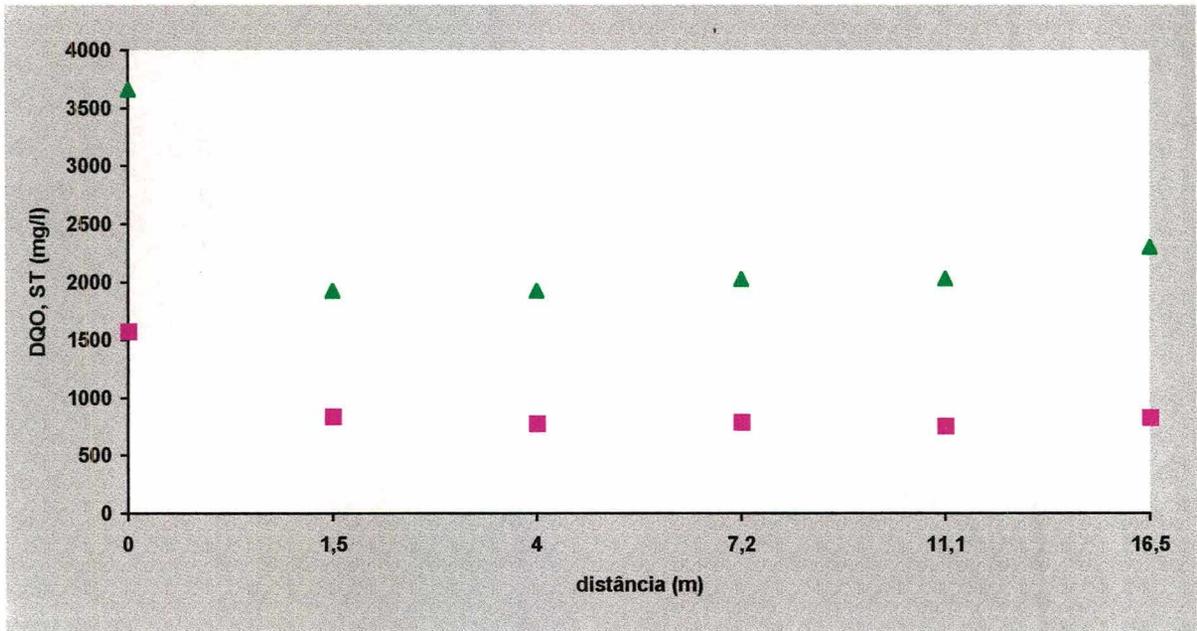


Fig. 4.18 - Evolução dos parâmetros: (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa facultativa LF do CNPSA/EMBRAPA, no período de março a outubro/96.

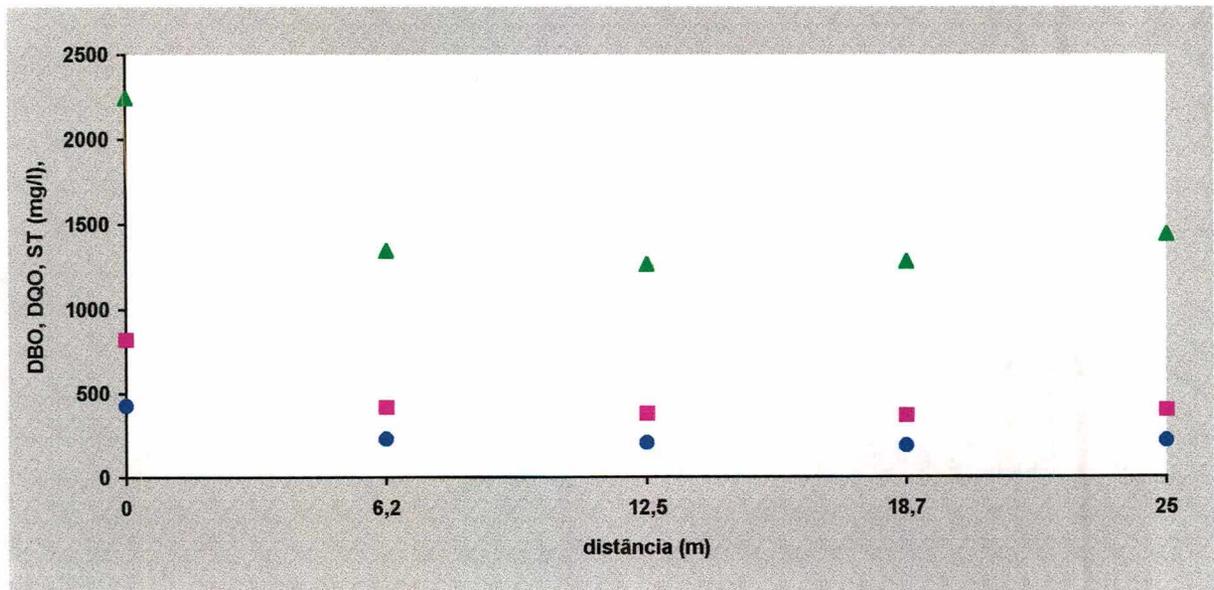


Fig. 4.19 - Evolução dos parâmetros: (O) DBO, (□) DQO e (Δ) ST ao longo da lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro/96 a fevereiro/97.

Observa-se (Figuras 4.16 - 4.19) que a água residuária ao adentrar a lagoa de estabilização é rapidamente diluída, ou seja, sofre uma homogeneização por toda lagoa, fazendo com que a sua concentração em termos de matéria orgânica, de sólidos e de nutrientes (Tabelas I.2 - I.5, anexo I) seja praticamente a mesma por toda ela. Assim, o modelo de mistura completa se ajusta melhor que o de fluxo pistão, porém necessita-se de estudos hidráulicos mais específicos, com traçadores, para determinação do fluxo real da lagoa.

### **4.3. Sistema de lagoas da Cooperativa Central Oeste Catarinense**

O monitoramento realizado na COOPERCENTRAL/AURORA não teve como objetivo principal a obtenção de parâmetros reais de funcionamento das lagoas de estabilização de dejetos suínos, mas sim, de um acompanhamento de perto do sistema na busca de subsídios para esta pesquisa, como por exemplo, o volume gasto de água por suíno e das concentrações dos dejetos para alguns parâmetros, tais como: pH, DBO, DQO, ST, SF, SV, NT, PT.

A Tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos no monitoramento desse sistema, durante o período de fevereiro a novembro de 1996. Nota-se que, embora a eficiência de remoção total da matéria carbonácea em termos de DBO<sub>5</sub> e DQO seja da ordem de 86% e 92%, respectivamente, o efluente final ainda necessita de tratamento para remoção da matéria orgânica remanescente, assim como os sólidos e os nutrientes, principalmente o nitrogênio, que se encontra bem acima das condições exigidas pela Legislação Ambiental de Santa Catarina (1981).

Admitindo-se cada lagoa como tendo o regime de mistura completa, os valores das constantes de degradação foram de 0,024 d<sup>-1</sup> para a DBO e 0,035 d<sup>-1</sup> para a DQO, para uma remoção de 82% e 89%, respectivamente, para a série de lagoas e com tempo de detenção total de 86,6 dias. Observa-se que estes valores de k foram inferiores aos obtidos no UNETDS do Centro Nacional de Pesquisas de Suíno e Aves/EMBRAPA.

Tabela 4.13 - Resultados do sistema da COOPERCENTRAL/AURORA, baseados no monitoramento, entre fevereiro e novembro de 1996 (tempo de detenção total = 86,6 dias).

| Médio,<br>Mínimo e<br>Máximo de | Dejeto bruto e efluentes da peneira e das lagoas |        |        |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|--|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                 | DB   | PV     | LA1    | LA2   | LE    | LF1   | LF2   | LM    |
| DBO <sub>5</sub><br>(mg/l)      | 6.300  | 4.850  | 3.600  | 1.125 | 1.025 | 925   | 750   | 875   |
|                                 | 4.600  | 4.500  | 2.400  | 750   | 850   | 800   | 600   | 500   |
|                                 | 8.000  | 5.200  | 4.800  | 1.500 | 1.200 | 1.050 | 900   | 1.250 |
| DQO<br>(mg/l)                   | 17.408   | 13.576 | 5.797  | 3.126 | 2.405 | 2.065 | 1.807 | 1.235 |
|                                 | 7.350  | 6.800  | 1.980  | 1.340 | 1.320 | 960   | 800   | 586   |
|                                 | 42.400   | 31.700 | 14.780 | 5.680 | 6.250 | 6.210 | 5.310 | 3.840 |
| ST<br>(mg/l)                    | 13.555   | 11.868 | 5.699  | 4.371 | 3.879 | 2.981 | 2.886 | 2.522 |
|                                 | 6.166  | 6.162  | 3.541  | 3.130 | 2.937 | 2.517 | 2.020 | 1.864 |
|                                 | 29.938   | 28.073 | 8.876  | 8.868 | 5.572 | 4.240 | 3.720 | 2.883 |
| SF<br>(mg/l)                    | 4.840  | 4.412  | 2.686  | 2.235 | 1.912 | 1.667 | 1.613 | 1.472 |
|                                 | 2.433  | 2.349  | 1.831  | 1.877 | 1.244 | 1.306 | 1.157 | 1.079 |
|                                 | 7.860  | 6.915  | 4.152  | 3.985 | 2.556 | 2.110 | 1.851 | 1.795 |
| SV<br>(mg/l)                    | 8.714  | 7.456  | 3.012  | 2.136 | 1.967 | 1.313 | 1.274 | 1.049 |
|                                 | 2.875  | 3.110  | 1.562  | 996   | 1.121 | 859   | 863   | 785   |
|                                 | 22.078   | 21.599 | 4.777  | 4.883 | 3.173 | 2.309 | 1.896 | 1.413 |
| NT<br>(mg/l)                    | 1.473  | 1.436  | 1.143  | 947   | 862   | 732   | 693   | 558   |
|                                 | 977  | 994    | 817    | 757   | 705   | 611   | 397   | 339   |
|                                 | 2.020  | 2.010  | 1.451  | 1.192 | 1.024 | 892   | 850   | 1.307 |
| PT<br>(mg/l)                    | 566  | 450    | 188    | 93    | 77    | 51    | 48    | 38    |
|                                 | 199  | 113    | 50     | 47    | 42    | 21    | 19    | 17    |
|                                 | 1.133  | 1.039  | 466    | 135   | 174   | 82    | 84    | 48    |
| pH                              | 8,7  | 8,7    | 8,2    | 8,1   | 8,0   | 7,7   | 7,5   | 7,4   |
|                                 | 8,0  | 6,7    | 7,3    | 7,5   | 7,0   | 6,0   | 6,0   | 6,0   |
|                                 | 11,0   | 10,0   | 10,0   | 10,0  | 9,0   | 9,0   | 9,0   | 9,0   |
| Temperatura<br>(° C)            | 22,3   | 21,3   | 19,8   | 19,1  | 18,5  | 18,3  | 17,7  | 17,4  |
|                                 | 16,0   | 15,0   | 14,0   | 14,0  | 12,0  | 12,0  | 11,0  | 11,0  |
|                                 | 30,0   | 28,0   | 27,0   | 27,0  | 26,5  | 26,5  | 26,0  | 26,0  |

A DBO<sub>5</sub> do efluente da lagoa de maturação LM (Tabela 4.13) foi maior que o afluente, em virtude das altas concentrações de sólidos suspensos (algas), já que a DBO<sub>5</sub> analisada foi a total.

#### **4.4. Conclusão do capítulo - Parâmetros fundamentais para dimensionamento de lagoas de dejetos suínos**

O crescimento da suinocultura acelerado e desordenado, principalmente na Região Oeste Catarinense, não foi acompanhado por um programa de planejamento de expansão de processos de tratamento dos resíduos orgânicos. Estudos realizados por Costa et al (1995a) e Medri et al (1996b) indicam que as lagoas de estabilização para dejetos suínos têm se destacado para tratamento da fração líquida, uma vez que elas apresentam um excelente desempenho quanto à eficiência de remoção da matéria orgânica, dos sólidos, dos nutrientes e de coliformes fecais.

Contudo, a grande dificuldade é como dimensionar essas lagoas para o tratamento desses resíduos, já que a nível de Brasil pouco se tem a respeito de parâmetros de projeto. Porém, para um tratamento básico de águas residuárias usando sistemas não convencionais são necessárias as seguintes unidades:

- tratamento preliminar - grade ou desarenador;
- tratamento primário - decantador ou peneira vibratória;
- tratamento secundário - lagoas: anaeróbias e facultativas;
- tratamento terciário - lagoas: de maturação, de alta taxa e de aguapés.

O tratamento preliminar visa apenas a retenção de sólidos grosseiros em suspensão e da areia, e é utilizado para proteção de bombas, enquanto que o tratamento primário destina-se à retenção dos sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica. Em ambos predominam os processos físicos na remoção dos poluentes. Já nos tratamentos secundário e terciário, predominam mecanismos de depuração biológica, sendo que a finalidade do primeiro é a remoção da matéria carbonácea, dos sólidos, dos nutrientes e no decaimento dos microorganismos patogênicos, e do segundo é basicamente a remoção dos nutrientes e dos agentes patógenos.

O tratamento terciário para esgoto doméstico é bastante raro a nível de condições brasileiras. No entanto, para tratamento de resíduos orgânicos de suínos é de suma importância, uma vez

que o efluente do tratamento secundário possui ainda elevados teores de nutrientes, principalmente de nitrogênio, o que deve ser minimizado com o tratamento terciário.

É importante ressaltar que os projetistas de lagoas de estabilização de águas residuárias domésticas, quando dimensionam lagoas de maturação, dão maior ênfase à mortalidade de CF e negligenciam a remoção de DBO, uma vez que a matéria carbonácea remanescente que chega a essa lagoa é baixa e mais resistente à biodegradação. Por outro lado, quando dimensionam lagoas anaeróbias, preocupam-se com a remoção da DBO e ignoram o decaimento de CF, já que o tempo de detenção é pequeno. No entanto, em se tratando de dejetos suínos, nem uma nem outra deve ser deixada de lado, pois o tempo de detenção hidráulica da lagoa anaeróbia é relativamente alto e a matéria carbonácea remanescente na lagoa de maturação é ainda elevada.

Outro aspecto relevante é referente aos nutrientes, principalmente o nitrogênio, o qual, em águas residuárias domésticas, não é visto com prioridade em razão de sua baixa concentração. Contudo, dejetos de suínos contêm altos teores de nitrogênio e quando não tratados eficientemente podem causar eutrofização do corpo receptor.

Para tanto, os resultados obtidos nos dois sistemas estudados: COOPERCENTRAL AURORA - Chapecó/SC e da unidade experimental de tratamento de dejetos suínos UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, Concórdia/SC, os resíduos orgânicos de suínos são merecedores de uma etapa terciária de tratamento, para adequação do efluente às exigências dos padrões estabelecidos na Legislação Ambiental. O objetivo principal desse tratamento é reduzir a potencialidade de ocorrência de eutrofização do corpo receptor. No presente estudo esse tratamento foi efetuado através de lagoas facultativa e de aguapés.

Na pesquisa realizada no sistema experimental de tratamento de dejetos suínos no CNPSA, observou-se que os parâmetros fundamentais para modelagem de lagoas que tratam esses resíduos, para adequação do efluente às exigências dos padrões ambientais são: DBO e Nitrogênio Total. Esses resíduos orgânicos são altamente concentrados em matéria orgânica e nutrientes, e suas remoções ocorrem de maneira adversa em sistema de lagoas, ou seja, o primeiro é removido basicamente nas lagoas anaeróbias, e o segundo nas lagoas facultativas e,

de uma forma otimizada, nas lagoas de aguapés. Haja visto que, conseguindo-se obter um efluente final com esses dois parâmetros dentro das condições exigidas pela Legislação Ambiental, os demais parâmetros em estudo também estarão em conformidade com as normas. A Figura 4.20 mostra o comportamento desses dois parâmetros (DBO, NT) quanto à remoção individual e acumulativa no decantador e em cada lagoa do sistema.

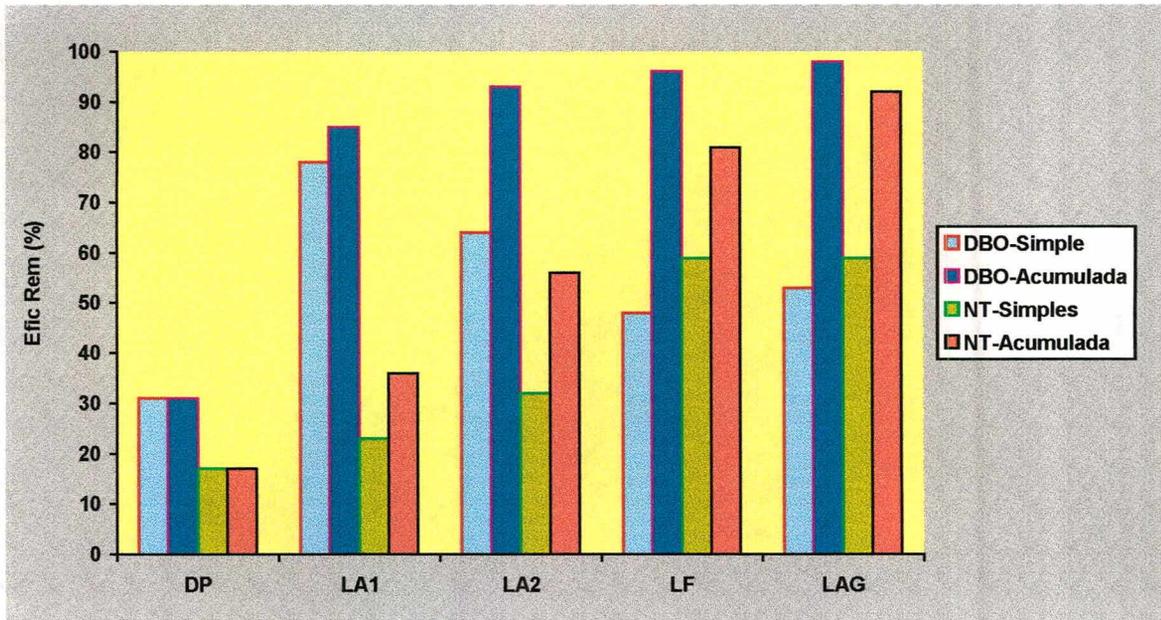


Fig. 4.20 - Eficiência de remoção da DBO<sub>5</sub> e do NT simples e acumulada, no decantador DP e nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, na lagoa facultativa LF, e na lagoa de aguapés LAG do CNPSA/EMBRAPA.

Observa-se que a remoção da DBO é realizada, basicamente, na lagoa anaeróbia primária LA1. Nesta lagoa a DBO em suspensão é sedimentada e através das atividades das bactérias estritamente anaeróbias ela é estabilizada, ou seja, ela sofre o processo de decomposição convertendo-se em gás carbônico, água e metano. Na lagoa anaeróbia LA2, ainda em condições de anaerobiose, a degradação acontece com menor intensidade, pois, além da matéria orgânica mais facilmente biodegradada ter sido removida na lagoa LA1, o número de microorganismos na lagoa LA2 para oxidação da DBO também é reduzido. Na lagoa

facultativa LF, a DBO solúvel e finamente particulada é estabilizada aerobicamente por bactérias dispersas no meio líquido, enquanto que a DBO suspensa tende a sedimentar, sendo estabilizada anaerobicamente por bactérias no fundo da lagoa. O oxigênio requerido pelas bactérias aeróbias é fornecido pelas algas, através da fotossíntese. Já na lagoa de aguapés LAG, a matéria orgânica é removida principalmente pelas plantas.

Quanto ao Nitrogênio total, sua remoção na lagoa facultativa LF ocorre, por apresentar condições favoráveis ao desenvolvimento de algas, as quais utilizam o  $\text{CO}_2$  existente no meio líquido diminuindo a acidez carbônica e, por conseguinte, ocorre a elevação do pH, proporcionando condições ótimas para o desprendimento da amônia livre para a atmosfera, além da assimilação da amônia pela biomassa algal. Porém, a lagoa LF da unidade experimental do CNPSA não apresentou um pH elevado ( $\text{pH} > 8$ ) suficiente para uma maior volatilização do  $\text{NH}_3$ . Na lagoa de aguapés LAG, a remoção do nitrogênio foi similar à da lagoa LF, tendo uma contribuição significativa para o processo, sendo ela efetuada principalmente pela absorção das plantas, uma vez que o pH não esteve tão alto para proporcionar elevada volatilização da amônia. Nas lagoas anaeróbias LA1 e LA2, a remoção do nitrogênio foi relativamente baixa, cerca de 23 e 32%, respectivamente, mas é igualmente importante para o processo como um todo. Silva et al (1995) trabalhando com lagoas piloto em série, para tratamento de esgotos domésticos, encontraram reduções de nitrogênio orgânico nas lagoas anaeróbias da ordem de 50%. Estes autores concluíram que nestas lagoas, uma pequena parte da remoção deste parâmetro ocorre através da volatilização da amônia livre e a outra parte pela sedimentação do nitrogênio orgânico particulado associado à matéria orgânica carbonácea não biodegradável, sendo que uma parte do nitrogênio orgânico sedimentado sofre o processo de estabilização pelas bactérias (amonificação) e a outra parte não biodegradável é incorporada ao lodo.

## CAPÍTULO 5

### 5. ESTRUTURA DE CUSTOS DO SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

#### 5.1. Introdução

Neste capítulo é abordada a questão de custos do sistema de tratamento. Para tanto são desenvolvidos modelos matemáticos de custos que incluem custo da terra, custo de construção e custo de operação.

Entre os sistemas de tratamento de águas residuárias, o uso de lagoas de estabilização é uma técnica antiga. Porém, segundo Meisheng e Xu (1991), Meisheng et al (1992), Kezhao (1994) e Li (1995), pesquisas recentes mostram que elas têm diversas vantagens, tais como baixo custo de capital, baixos custos de operação e manutenção, além da eficácia, simplicidade e flexibilidade se comparadas com outros métodos de tratamento; contudo, têm uma importante desvantagem, ocupam grandes áreas de terra. Para Arthur (1983) e Oragui (1987) isto é certamente a principal desvantagem atribuída à lagoa de estabilização de resíduos orgânicos.

Muitas informações sobre lagoas existentes nos apontam uma série de defeitos em seu funcionamento. De acordo com Hess (1980), projetos de lagoas consistem não apenas em determinar sua área superficial e profundidade, mas, principalmente, em resolver detalhes de construção e especificações que assegurem um funcionamento adequado do sistema ao longo de sua vida.

O custo de um sistema de lagoas, segundo Li (1995), é caracterizado por custos direto e indireto. Os custos diretos compreendem: custo de construção, de instalação e da terra; e os custos indiretos consistem de: taxas, projetos e custos de operação e de manutenção.

No custo total de lagoas de estabilização deve estar incluído custo de capital (que pode ser dividido em custos de aquisição da terra e de construção do sistema), custos de operação e manutenção, os quais são inerentes à distribuição da carga orgânica de cada lagoa (Meisheng e Xu, 1991; Meisheng et al, 1992; Kezhao, 1994; Yang e Chen, 1994). Se há qualquer outro custo, chamado custo eventual, deve ser contabilizado no custo total (Meisheng et al, 1992; Kezhao, 1994).

Na prática, uma das finalidades deste trabalho é proporcionar uma metodologia para a avaliação de custos quanto à implantação de sistemas de lagoas de tratamento de dejetos suínos, criando condições para o estudo da sua viabilidade. Além disso, a qualificação e quantificação dos custos são aspectos fundamentais de um processo de otimização que pretendem ser útil ao planejamento de projetos de lagoas de tratamento de dejetos suínos.

## 5.2. Estrutura de custos do sistema de lagoas

Com o objetivo de analisar a capacidade de expansão do sistema de lagoas de estabilização de águas residuárias, procurou-se a obtenção de uma estrutura de custos, cujo resultado final fosse apresentado pela seguinte equação:

$$C_T = C_t + C_c + C_o \quad (5.1)$$

na qual, o custo total ( $C_T$ ) de um sistema de lagoas de estabilização é caracterizado pelos modelos de custo de área de terra ocupada ( $C_t$ ), de custo de construção ( $C_c$ ) e de custo de operação ( $C_o$ ).

Cabe salientar que o modelo de custo de construção pode ser subdividido em custos de movimento da terra (limpeza do terreno, escavação mecânica, construção de taludes, transporte e descarga de terra excedente e compactação ou revestimento das lagoas) e de colocação de chicanas, se for necessário. O modelo de custo operacional pode ser subdividido em custos de manutenção (despesas do servidor incluindo: salário, décimo terceiro, encargos sociais, etc.) e

de monitoramento (despesas de coletas e análises de parâmetros), todavia, este último não foi considerado em razão de não se ter uma Lei Ambiental que determine os parâmetros a serem analisados e suas respectivas frequências.

Para a obtenção dos modelos matemáticos dos custos mencionados, foram analisados os custos abaixo relacionados e que constam dos itens a seguir:

- Local do sistema de lagoas de estabilização ( $C_t$ );
- Movimento de terra das lagoas ( $C_{mt}$ );
- Revestimento das lagoas ( $C_{re}$ );
- Colocação de chicanas na lagoa ( $C_{ch}$ );
- Despesas de manutenção ( $C_{ma}$ ).

Assim, a equação acima pode ser reescrita como:

$$C_T = C_t + C_{mt} + C_{re} + C_{ch} + C_{ma} \quad (5.2)$$

Segundo Ellis (1991), a programação linear é inadequada para o processo de otimização de estações de tratamento, dado que as relações de tratamento de águas residuárias, quer sejam racional ou empírica, são normalmente não lineares. Clark (1987) argumenta que os custos nem sempre variam linearmente com a quantidade produzida. Normalmente existem economias e deseconomias de escala. Se o custo médio por unidade de capacidade é decrescente, então existe economia de escala. Por outro lado, se os custos médios unitários aumentam, ocorre a deseconomia de escala.

Na análise econômica de estações de tratamento de águas residuárias, o custo de capital, o custo operacional e o custo de área de terra ocupada pelo sistema não variam proporcionalmente com a vazão do projeto (Meisheng e Xu, 1991). Para Sarikaya et al (1996), os custos de investimento, de operação e de manutenção são proporcionais à DQO, aos Sólidos Suspensos Totais (SST) e à vazão.

### 5.3. Modelo matemático

Pesquisadores da área de saneamento no Brasil se defrontam com grande problema da ausência de modelos matemáticos de custos que possibilitem uma avaliação na tomada de decisão.

O objetivo, aqui, é a obtenção dos modelos matemáticos que caracterizam a estrutura de custos da área de terra ocupada, de construção e de operação e que possibilitem a definição de uma função de produção, tendo em vista que, em geral, os pesquisadores têm associado estimativas de custos às variáveis agregadas à capacidade.

#### 5.3.1. Custo de área de terra ocupada pelo sistema de lagoas

O modelo de custo de terra ocupada pelo sistema de lagoas é explicado por duas variáveis independentes, área de terra em  $m^2$  e preço em  $R\$/m^2$ .

*O modelo de custo a ser ajustado é representado pela equação:*

$$C_t = A_t P_t \quad (5.3)$$

onde:

$C_t$  = custo total de área de terra ocupada pelas lagoas, em R\$;

$A_t$  = área de terra ocupada pelas lagoas, em  $m^2$ ;

$P_t$  = preço da terra ocupada pelas lagoas, em  $R\$/m^2$ .

#### 5.3.2. Custo de construção das lagoas de estabilização

Os custos de construção das lagoas de estabilização foram divididos em três modelos. O primeiro para expressar o movimento da terra, o segundo para o revestimento das lagoas e o último para a colocação de chicanas.

*O modelo de custo do movimento da terra a ser ajustado é dado pela equação abaixo:*

$$C_{mt} = \alpha V^\beta \quad (5.4)$$

onde:

$C_{mt}$  = custo total de movimento da terra, em R\$;

$V$  = volume total de movimento de terra, em  $m^3$ ;

$\alpha$  = constante de custo de movimento da terra, em  $R\$/m^3$ ;

$\beta$  = fator de economia de escala.

*O modelo de custo de revestimento das lagoas a ser ajustado é expresso pela equação:*

$$C_{re} = \tau V^\psi \quad (5.5)$$

onde:  $C_{re}$  = custo total de revestimento da lagoa, em R\$;

$V$  = volume total de revestimento da lagoa, em  $m^3$ ;

$\tau$  = constante de custo de revestimento da lagoa, em  $R\$/m^3$ ;

$\psi$  = fator de economia de escala.

O modelo de custo definido pela colocação de chicanas que melhor se adapta é explicado pelas variáveis independentes, isto é, área a ser colocadas chicanas em  $m^2$  e preço em  $R\$/m^2$ .

*O modelo matemático a ser ajustado é representado pela equação:*

$$C_{ch} = A_{ch} P_{ch} \quad (5.6)$$

onde:

$C_{ch}$  = custo total de colocação de chicanas, em R\$;

$A_{ch}$  = área ocupada pelas chicanas, em  $m^2$ ;

$P_{ch}$  = preço de colocação de chicanas, em  $R\$/m^2$ .

Portanto, o custo total de construção pode ser reescrito como: uma combinação das equações (5.4), (5.5) e (5.6), isto é,

$$C_c = C_{mt} + C_{re} + C_{ch} \quad (5.7)$$

$$C_c = \alpha V^\beta + \tau V^\psi + A_{ch} P_{ch} \quad (5.8)$$

### 5.3.3. Custo de operação do sistema de lagoas de estabilização

Apesar da simplicidade operacional, as lagoas de estabilização não devem ser tratadas com descaso. Existe uma série de procedimentos de operação e manutenção que deve ser seguida para que não ocorram problemas operacionais, ambientais e de estética.

#### *Modelo de custo de manutenção do sistema*

A manutenção do sistema de tratamento é estimada com base no número mínimo de pessoas necessárias para a limpeza da área do mesmo. Assim, os suinocultores terão despesas mensais com seus servidores durante um horizonte de planejamento. Pesquisadores da área, como Yang et al (1997), através de estudos em sistema de lagoas para tratamento de dejetos suínos, indicam esse período como sendo de 10 anos. Neste caso, para uniformidade de datas, os custos mensais serão contabilizados na data presente do investimento.

*O modelo a ser ajustado que melhor resultado representa para expressar o custo de despesas com pessoal envolvido na manutenção é dado pela equação abaixo:*

$$C_{ma} = \eta A^\Gamma \quad (5.9)$$

onde:  $C_{ma}$  = despesa total com pessoal da manutenção, em R\$;

$A$  = área de terra ocupada pelo sistema de lagoas, em  $m^2$ ;

$\eta$  = constantes de gastos com pessoal da manutenção, em R\$/ $m^2$ ;

$\Gamma$  = fator de economia de escala.

O cálculo do valor presente do custo de manutenção, dentro de um processo financeiro, está apresentado na Figura 5.1 Seja o esquema abaixo para a forma de um desembolso de recursos para custear a manutenção do sistema para um período de planejamento “tp”. O custo de manutenção do sistema de tratamento é dado pelo valor presente “Vp”.

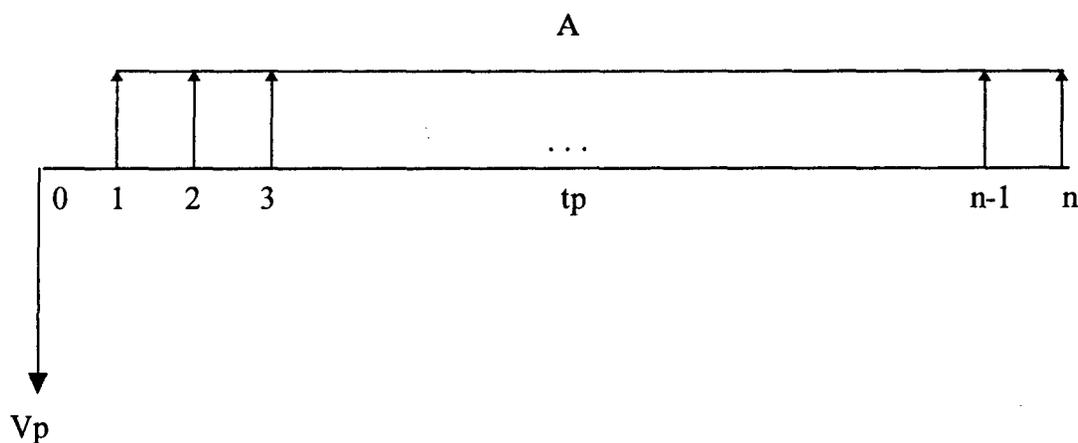


Fig. 5.1 - Esquema de fluxo de recursos de desembolso e pagamento do pessoal de manutenção.

Onde, A é a série uniforme de custo mensal do produtor no período de planejamento.

Considerando-se que os recursos de custeio sejam desembolsados em uma série permanente de pagamento “A”, durante um certo número de períodos “n”, a uma taxa de juros “r” equivalente à taxa mínima de atratividade (TMA) do investidor, então, o valor presente do custo de manutenção pode ser calculado pela equação abaixo:

$$Vp = A \left[ \frac{(1 + r)^n - 1}{r \cdot (1 + r)^n} \right] \quad (5.10)$$

Neste caso, o valor presente (Vp) é o próprio custo de manutenção do sistema de lagoas ( $C_{ma}$ ).

#### 5.4. Otimização do sistema - avaliação de um parâmetro

Aqui é considerado um parâmetro, e que se degrada com o tempo de detenção.

Existem diversas maneiras para otimizar os sistemas de lagoas de estabilização sob diferentes condições (Meisheng et al, 1992; Kezhao, 1994). Contudo, a otimização destes sistemas significa minimizar o custo total tais como: custo de área de terra ocupada, custos de construção e operação e custos eventuais, e obter uma adequada eficiência em termos de matéria orgânica ( $DBO_5$  ou DQO).

A otimização aqui consiste na remoção da matéria orgânica (DBO) em um sistema de lagoas em série, objetivando o sistema mais econômico e com o efluente final desejado. Dessa forma, a função objetivo na minimização do sistema de lagoas de estabilização compreende o custo total, o qual inclui custo da terra e custos de construção e de manutenção, e as condições de restrições do sistema, isto é, a qualidade do efluente final desejada.

Como já foi mencionado no item 2.5, a configuração mais adequada quando um conjunto de lagoas é operado em série para remoção de matéria orgânica, dos sólidos, dos nutrientes e de coliformes fecais; a primeira é anaeróbia, seguida de uma facultativa e a última é de maturação. Porém, outras configurações podem ser usadas, principalmente quando se trata de dejetos suínos, os quais contêm elevadas concentrações, necessitando de mais lagoas. A Figura 5.2 apresenta um esquema de sistema de lagoas de tratamento.

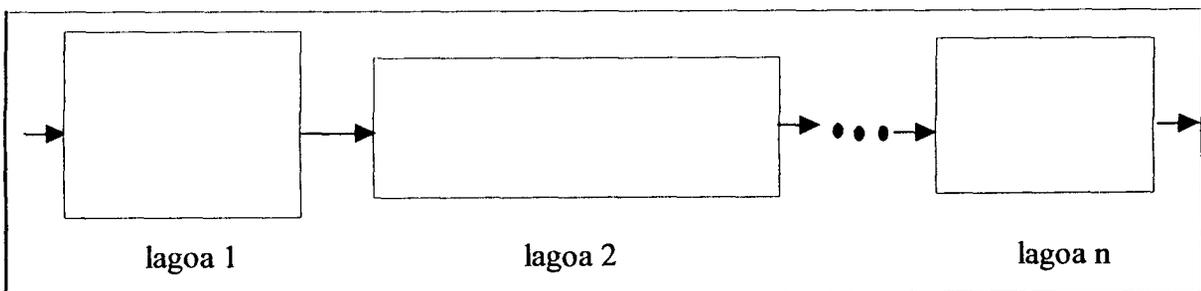


Fig. 5.2 - Representação de um sistema de lagoas de estabilização.

O objetivo, agora, é a obtenção dos modelos matemáticos que caracterizam a eficiência das lagoas em termos da DBO<sub>5</sub> ou DQO e a estrutura de custos.

#### 5.4.1. Modelo matemático de eficiência de cada lagoa

A remoção dos parâmetros DBO e DQO processa-se segundo uma reação de primeira ordem, na qual a taxa de reação é diretamente proporcional à concentração do substrato. Nestas condições, a eficiência de cada lagoa pode ser representada através da Figura 5.3.

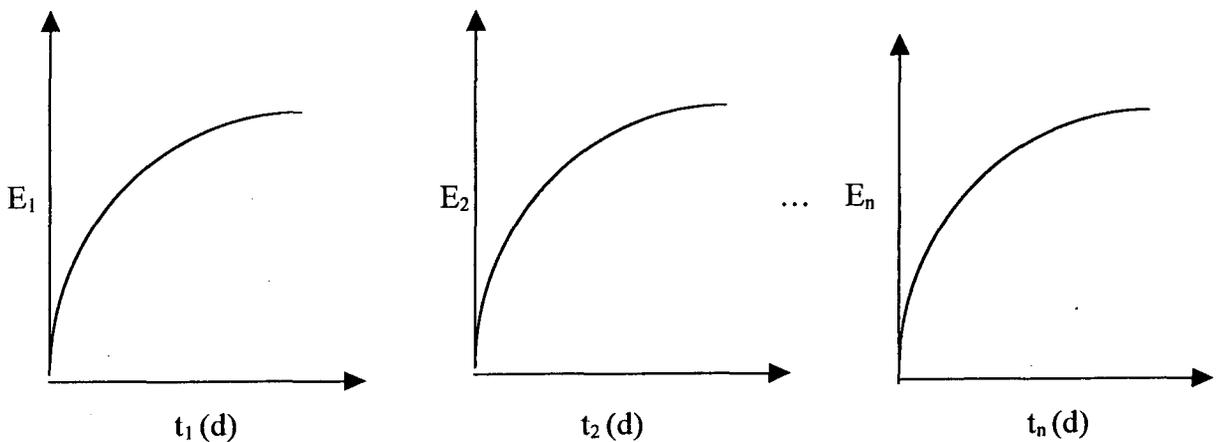


Fig. 5.3 - Eficiência de remoção dos parâmetros DBO e DQO em cada lagoa com o tempo de permanência.

A eficiência de cada lagoa com relação ao tempo de detenção é dada pelas equações a seguir:

$$E_1 = \frac{t_1}{\mu_1 t_1 + \lambda_1} \quad (5.11)$$

$$E_2 = \frac{t_2}{\mu_2 t_2 + \lambda_2} \quad (5.12)$$

.....

$$E_n = \frac{t_n}{\mu_n t_n + \lambda_n} \quad (5.13)$$

onde:

$E_i$  é a eficiência da lagoa  $i$ ;

$t_i$  é o tempo de detenção da lagoa  $i$ , em dia;

$\mu_i, \lambda_i$  são as constantes do modelo, sendo  $\lambda_i$ , em dia.

#### 5.4.2. Tempo de detenção da lagoa $i$

Como se sabe, o tempo de detenção de cada lagoa de estabilização é dado por:

$$t_i = \frac{V_i}{Q} \quad (5.14)$$

onde:

$t_i$  é o tempo de detenção da lagoa  $i$ , em dia;

$V_i$  é o volume da lagoa  $i$ , em  $m^3$ ;

$Q$  é a vazão do sistema, em  $m^3$ /dia.

### 5.4.3. Modelo matemático da estrutura de custos

Para a otimização do sistema deve-se construir um modelo matemático para cada lagoa, levando-se em consideração os custos: da terra, de construção e de operação.

#### 5.4.3.1. Custo da terra

O custo da terra está associado não somente à área ocupada pelas lagoas do sistema, mas também pelas áreas adjacentes a elas para circulação de pessoas e/ou veículos. Dessa forma, o modelo matemático que melhor representa a estrutura de custo de área de terra ocupada por cada lagoa é obtido nas equações abaixo:

$$C_{i1} = 2 \gamma_1 P_i V_i \quad (5.15)$$

$$C_{i2} = 2 \gamma_2 P_i V_i \quad (5.16)$$

.....

$$C_{in} = 2 \gamma_n P_i V_n \quad (5.17)$$

onde:

$C_{ii}$  é o custo da terra ocupada pela lagoa  $i$ , em R\$;

$P_i$  é o preço da terra, em R\$/m<sup>2</sup>;

$\gamma_i$  é a relação entre a superfície e o volume da lagoa  $i$ , em m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

OBS: O número 2 representa 100% a mais da área total requerida para as lagoas, seja ela para circulação de pessoas e/ou veículos. Sendo, portanto, a área de manutenção do sistema.

### 5.4.3.2. Custo de construção

Como já visto, o custo de construção foi subdividido em:

#### a) Custo de movimento de terra

Dentre tais custos podem ser incluídos a escavação mecânica e terraplenagem (limpeza, escavação, construção de taludes, transporte e descarga de terra excedente das lagoas). Assim, o custo de movimento da terra pode ser expresso por:

$$C_{mt1} = \alpha V_1^\beta \quad (5.18)$$

$$C_{mt2} = \alpha V_2^\beta \quad (5.19)$$

.....

$$C_{mnt} = \alpha V_n^\beta \quad (5.20)$$

onde:

$C_{mti}$  é o custo de movimento de terra da lagoa i, em R\$;

$\alpha$  é a constante do custo de movimento da terra, em R\$/m<sup>3</sup>;

$\beta$  é o fator de economia de escala.

#### b) Custo de revestimento das lagoas

O modelo matemático que melhor expressa o custo de revestimento de cada lagoa é apresentado pelas seguintes equações:

$$C_{re1} = \tau V_1^\psi \quad (5.21)$$

$$C_{re2} = \tau V_2^\psi \quad (5.22)$$

.....

$$C_{ren} = \tau V_n^\psi \quad (5.23)$$

onde:

$C_{rei}$  é o custo de revestimento da lagoa  $i$ , em R\$;

$\tau$  é a constante do custo de revestimento da lagoa, em R\$/m<sup>3</sup>;

$\Psi$  é o fator de economia de escala.

**c) Custo de colocação de chicanas**

Para a colocação de chicanas, o custo de cada lagoa é representado por:

$$C_{ch1} = \delta_1 P_{ch} V_1 \tag{5.24}$$

$$C_{ch2} = \delta_2 P_{ch} V_2 \tag{5.25}$$

.....

$$C_{chn} = \delta_n P_{ch} V_n \tag{5.26}$$

onde:

$C_{ch}$  é o custo de colocação de chicanas na lagoa  $i$ , em R\$;

$P_{ch}$  é o preço de colocação de chicanas, em R\$/m<sup>2</sup>;

$\delta_i$  é a relação entre a área de chicanas colocadas e o volume da lagoa  $i$ , em m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

Portanto, o custo de construção pode ser reescrito como:

$$C_{c1} = \alpha V_1^\beta + \tau V_1^\Psi + \delta_1 P_{ch} V_1 \tag{5.27}$$

$$C_{c2} = \alpha V_2^\beta + \tau V_2^\Psi + \delta_2 P_{ch} V_2 \tag{5.28}$$

.....

$$C_{cn} = \alpha V_n^\beta + \tau V_n^\Psi + \delta_n P_{ch} V_n \tag{5.29}$$

na qual  $C_{ci}$  é o custo de construção da lagoa  $i$ .

### 5.4.3.3. Custo de operação

O custo de operação envolve a despesa de manutenção das lagoas, como já foi enfatizado. O seu valor será computado na data presente do investimento, o qual resulta de uma série de gastos mensais, ao longo do horizonte de planejamento. Neste caso, a manutenção das lagoas deve ser caracterizada pela área total do sistema, através das seguintes equações:

$$Ct_{ma} = C_{ma1} + C_{ma2} + \dots + C_{man} \quad (5.30)$$

ou

$$Ct_{ma} = \phi \eta (\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_n V_n)^\Gamma \quad (5.31)$$

onde:

$$\phi = \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \quad (5.32)$$

$Ct_{ma}$  é o custo total do sistema de lagoas, em R\$;

$C_{mai}$  é o custo de manutenção da lagoa  $i$ , em R\$;

$\eta$  é a constante do custo de limpeza da área de terra, R\$/m<sup>2</sup>;

$\Gamma$  é o fator de economia de escala;

$\phi$  é o fator do valor presente;

$r$  é a taxa de juro anual;

$n$  o tempo de vida útil do sistema, em anos.

Da equação (5.15) a (5.30) tem-se os custos do sistema:

$$C_1 = 2 \gamma_1 P_t V_1 + \alpha V_1^\beta + \tau V_1^\psi + \delta_1 P_{ch} V_1 + C_{ma1} \quad (5.33)$$

$$C_2 = 2 \gamma_2 P_t V_2 + \alpha V_2^\beta + \tau V_2^\psi + \delta_2 P_{ch} V_2 + C_{ma2} \quad (5.34)$$

.....

$$C_n = 2 \gamma_n P_t V_n + \alpha V_n^\beta + \tau V_n^\psi + \delta_n P_{ch} V_n + C_{man} \quad (5.35)$$

Rearranjando-se as equações acima, tem-se:

$$C_1 = V_1 (2 \gamma_1 P_t + \delta_1 P_{ch}) + \alpha V_1^\beta + \tau V_1^\psi + C_{ma1} \quad (5.36)$$

$$C_2 = V_2 (2 \gamma_2 P_t + \delta_2 P_{ch}) + \alpha V_2^\beta + \tau V_2^\psi + C_{ma2} \quad (5.37)$$

.....

$$C_n = V_n (2 \gamma_n P_t + \delta_n P_{ch}) + \alpha V_n^\beta + \tau V_n^\psi + C_{man} \quad (5.38)$$

na qual,  $C_i$  é o custo da lagoa  $i$ , em R\$

Da equação (5.11) a (5.14), tem-se:

$$V_1 = Q \lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} \quad (5.39)$$

$$V_2 = Q \lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} \quad (5.40)$$

.....

$$V_n = Q \lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} \quad (5.41)$$

Substituindo-se as equações (5.39), (5.40) e (5.41) nas equações (5.36), (5.37) e (5.38), respectivamente, tem-se:

$$C_1 = [Q \lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1}] (2 \gamma_1 P_t + \delta_1 P_{ch}) + \alpha [Q \lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1}]^\beta + \tau [Q \lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1}]^\psi + C_{ma1} \quad (5.42)$$

$$C_2 = [Q \lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1}] (2 \gamma_2 P_t + \delta_2 P_{ch}) + \alpha [Q \lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1}]^\beta + \tau [Q \lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1}]^\psi + C_{ma2} \quad (5.43)$$

.....

$$C_n = [Q \lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1}] (2 \gamma_n P_t + \delta_n P_{ch}) + \alpha [Q \lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1}]^\beta + \tau [Q \lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1}]^\psi + C_{man} \quad (5.44)$$



As variáveis independentes da função objetivo,  $E_1, E_2, \dots, E_n$  são chamadas de variáveis de decisão ou variáveis do projeto.

O programa, além de calcular o custo mínimo do sistema de tratamento de lagoas de estabilização durante um horizonte de planejamento, determina a eficiência, o tempo de detenção, o volume e a área de cada lagoa.

## 5.5. Otimização do sistema - avaliação de dois parâmetros

Neste caso serão considerados dois parâmetros que se degradam com o tempo de detenção, como explica o item a seguir.

### 5.5.1. Modelo matemático de eficiência de cada lagoa

Em razão do pH se manter praticamente neutro nas lagoas anaeróbias, a remoção do nitrogênio através da volatilização para a atmosfera é reduzida. Assim é possível que a remoção deste parâmetro não ocorra segundo a cinética de primeira ordem. Contudo, através do experimento realizado no CNPSA, constatou-se remoção do nitrogênio nestas lagoas. Dessa forma, os modelos de eficiência para as lagoas podem ser representados pelas equações como segue:

*- para as lagoas anaeróbias, os modelos de eficiência de remoção da DBO são:*

$$Ea_1 = \left( \frac{t_1}{\mu a_1 t_1 + \lambda a_1} \right) F_1 \quad (5.47)$$

$$Ea_2 = \left( \frac{t_2}{\mu a_2 t_2 + \lambda a_2} \right) F_2 \quad (5.48)$$

.....

$$Ea_n = \left( \frac{t_n}{\mu a_n t_n + \lambda a_n} \right) F_n \quad (5.49)$$

onde:  $E_{a_i}$  é a eficiência da lagoa anaeróbia  $i$ , em termos de DBO;

$t_i$  é o tempo de detenção da lagoa  $i$ , em dia;

$\mu_{a_i}$  e  $\lambda_{a_i}$  são as constantes do modelo, em termos de DBO, sendo  $\lambda_{a_i}$ , em dia;

$F_i$  são fatores de calibração do modelo;

- para as lagoas facultativas e de aguapés, os modelos de eficiência de remoção dos parâmetros: **DBO** e **NT** são caracterizados pelas respectivas equações:

$$E_1 = \frac{t_1}{\mu_1 t_1 + \lambda_1}, \quad E_1 = \frac{t_1}{\mu_1' t_1 + \lambda_1'} \quad (5.50)$$

$$E_2 = \frac{t_2}{\mu_2 t_2 + \lambda_2}, \quad E_2 = \frac{t_2}{\mu_2' t_2 + \lambda_2'} \quad (5.51)$$

.....

$$E_n = \frac{t_n}{\mu_n t_n + \lambda_n}, \quad E_n = \frac{t_n}{\mu_n' t_n + \lambda_n'} \quad (5.52)$$

onde:  $E_i$  é a eficiência da lagoa  $i$ ;

$t_i$  é o tempo de detenção da lagoa  $i$ , em dia;

$\mu_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\mu_i'$  e  $\lambda_i'$  são as constantes do modelo, sendo  $\lambda_i$  e  $\lambda_i'$ , em dia.

### 5.5.2. Tempo de detenção da lagoa $i$

$$t_i = \frac{V_i}{Q} \quad (5.53)$$

$t_i$  é o tempo de detenção da lagoa  $i$ , em dia;

$V_i$  é o volume da lagoa  $i$ , em  $m^3$ ;

$Q$  é a capacidade do sistema, em  $m^3$ /dia.

Da equação (5.15) a (5.30) tem-se os custos do sistema:

$$C_1 = V_1 (2 \gamma_1 P_t + \delta_1 P_{ch}) + \alpha V_1^\beta + \tau V_1^\psi + C_{ma1} \quad (5.54)$$

$$C_2 = V_2 (2 \gamma_2 P_t + \delta_2 P_{ch}) + \alpha V_2^\beta + \tau V_2^\psi + C_{ma2} \quad (5.55)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$C_n = V_n (2 \gamma_n P_t + \delta_n P_{ch}) + \alpha V_n^\beta + \tau V_n^\psi + C_{man} \quad (5.56)$$

Da equação (5.47) a (5.53), tem-se:

- para as lagoas anaeróbias;

$$Va_1 = Q \lambda a_1 (F_1 Ea_1^{-1} - \mu a_1)^{-1} \quad (5.57)$$

$$Va_2 = Q \lambda a_2 (F_2 Ea_2^{-1} - \mu a_2)^{-1} \quad (5.58)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$Va_n = Q \lambda a_n (F_n Ea_n^{-1} - \mu a_n)^{-1} \quad (5.59)$$

onde  $Va_i$  é o volume da lagoa anaeróbia  $i$

- para as lagoas facultativas e de aguapés;

$$V_1 = \frac{Q}{2} [\lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \lambda_1' (E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}] \quad (5.60)$$

$$V_2 = \frac{Q}{2} [\lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2' (E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}] \quad (5.61)$$

$$\dots\dots\dots$$

$$V_n = \frac{Q}{2} [\lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n' (E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}] \quad (5.62)$$

Substituindo-se as equações (5.57), (5.58) e (5.59) nas equações (5.54), (5.55) e (5.56), respectivamente, tem-se os custos das lagoas anaeróbias:

$$Ca_1 = Q\lambda a_1 (F_1 Ea_1^{-1} - \mu a_1)^{-1} (2\gamma a_1 P_t + \delta a_1 P_{ch}) + \alpha [Q\lambda a_1 (F_1 Ea_1^{-1} - \mu a_1)^{-1}]^\beta + \tau [Q\lambda a_1 (F_1 Ea_1^{-1} - \mu a_1)^{-1}]^\psi + Ca_{mai} \quad (5.63)$$

$$Ca_2 = Q\lambda a_2 (F_2 Ea_2^{-1} - \mu a_2)^{-1} (2\gamma a_2 P_t + \delta a_2 P_{ch}) + \alpha [Q\lambda a_2 (F_2 Ea_2^{-1} - \mu a_2)^{-1}]^\beta + \tau [Q\lambda a_2 (F_2 Ea_2^{-1} - \mu a_2)^{-1}]^\psi + Ca_{ma2} \quad (5.64)$$

.....

$$Ca_n = Q\lambda a_n (F_n Ea_n^{-1} - \mu a_n)^{-1} (2\gamma a_n P_t + \delta a_n P_{ch}) + \alpha [Q\lambda a_n (F_n Ea_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}]^\beta + \tau [Q\lambda a_n (F_n Ea_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}]^\psi + Ca_{man} \quad (5.65)$$

onde:

$Ca_i$  é o custo da lagoa  $i$ , em R\$;

$Ca_{mai}$  é o custo de manutenção da lagoa anaeróbia  $i$ , em R\$;

$\gamma a_i$  é a relação entre a superfície e o volume da lagoa anaeróbia  $i$ , em  $m^2/m^3$ ;

$\delta a_i$  é a relação entre a área de chicanas e o volume da lagoa anaeróbia  $i$ , em  $m^2/m^3$ .

Substituindo-se as equações (5.60), (5.61) e (5.62) nas equações (5.54), (5.55) e (5.56), respectivamente, tem-se os custos das lagoas facultativas e de aguapés:

$$C_i = \frac{Q}{2} [\lambda_i (E_i^{-1} - \mu_i)^{-1} + \lambda_i' (E_i^{-1} - \mu_i')^{-1}] (2\gamma_i P_t + \delta_i P_{ch}) + \alpha \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_i (E_i^{-1} - \mu_i)^{-1} + \lambda_i' (E_i^{-1} - \mu_i')^{-1}] \right\}^\beta + \tau \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_i (E_i^{-1} - \mu_i)^{-1} + \lambda_i' (E_i^{-1} - \mu_i')^{-1}] \right\}^\psi + C_{mai} \quad (5.66)$$

$$C_2 = \frac{Q}{2} [\lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2' (E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}] (2 \gamma_2 P_t + \delta_2 P_{ch}) + \alpha \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2' (E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}] \right\}^\beta + \tau \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2' (E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}] \right\}^\psi + C_{ma2} \quad (5.67)$$

$$C_n = \frac{Q}{2} [\lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n' (E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}] (2 \gamma_n P_t + \delta_n P_{ch}) + \alpha \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n' (E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}] \right\}^\beta + \tau \left\{ \frac{Q}{2} [\lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n' (E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}] \right\}^\psi + C_{mai} \quad (5.68)$$

onde:

$C_i$  é o custo da  $i$ -ésima lagoa facultativa ou de aguapés, em R\$;

$C_{mai}$  é o custo de manutenção da lagoa facultativa ou de aguapés  $i$ , em R\$.

### 5.5.3. Função objetivo

A função objetivo na otimização do sistema de lagoas de estabilização é dada por:

$$\text{Min } C_T = \sum_{i=1}^n C a_i + \sum_{i=1}^n C_i + C_e \quad (5.69)$$

$$S. a: \quad E_o \geq E_d$$

$$0 \leq E a_1 \leq 1; \quad 0 \leq E a_2 \leq 1; \quad \dots \quad 0 \leq E a_n \leq 1;$$

$$0 \leq E_1 \leq 1; \quad 0 \leq E_2 \leq 1; \quad \dots \quad 0 \leq E_n \leq 1;$$

onde:

$C_T$  é o custo total do sistema, em R\$;

$C_e$  é o custo eventual, em R\$;

$E_o$  é a eficiência obtida do sistema;

$E_d$  é a eficiência desejada do sistema.

Assim, o problema com dois parâmetros (DBO e NT) pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}
\text{Min}C_T &= Q\lambda a_1(F_1 E a_1^{-1} - \mu a_1)^{-1}(2\gamma a_1 P_i + \delta a_1 P_{ch}) + \alpha[Q\lambda a_1(F_1 E a_1^{-1} - \mu a_1)^{-1}]^\beta + \\
&\tau[Q\lambda a_1(F_1 E a_1^{-1} - \mu a_1)^{-1}]^\psi + \\
&Q\lambda a_2(F_2 E a_2^{-1} - \mu a_2)^{-1}(2\gamma a_2 P_i + \delta a_2 P_{ch}) + \alpha[Q\lambda a_2(F_2 E a_2^{-1} - \mu a_2)^{-1}]^\beta + \\
&\tau[Q\lambda a_2(F_2 E a_2^{-1} - \mu a_2)^{-1}]^\psi + \\
&\dots\dots\dots \\
&Q\lambda a_n(F_n E a_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}(2\gamma a_n P_i + \delta a_n P_{ch}) + \alpha[Q\lambda a_n(F_n E a_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}]^\beta + \\
&\tau[Q\lambda a_n(F_n E a_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}]^\psi + \\
&\frac{Q}{2}[\lambda_1(E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \lambda_1'(E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}](2\gamma_1 P_i + \delta_1 P_{ch}) + \alpha\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_1(E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \right. \\
&\lambda_1'(E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}]\left.\right\}^\beta + \tau\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_1(E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \lambda_1'(E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}]\right\}^\psi + \\
&\frac{Q}{2}[\lambda_2(E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2'(E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}](2\gamma_2 P_i + \delta_2 P_{ch}) + \alpha\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_2(E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \right. \\
&\lambda_2'(E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}]\left.\right\}^\beta + \tau\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_2(E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2'(E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}]\right\}^\psi + \\
&\dots\dots\dots \\
&\frac{Q}{2}[\lambda_n(E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n'(E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}](2\gamma_n P_i + \delta_n P_{ch}) + \alpha\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_n(E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \right. \\
&\lambda_n'(E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}]\left.\right\}^\beta + \tau\left\{\frac{Q}{2}[\lambda_n(E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n'(E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}]\right\}^\psi + \\
&\phi\eta\{Q[\gamma a_1 \lambda a_1(F_1 E a_1^{-1} - \mu a_1)^{-1} + \gamma a_2 \lambda a_2(F_2 E a_2^{-1} - \mu a_2)^{-1} + \dots + \\
&\gamma a_n \lambda a_n(F_n E a_n^{-1} - \mu a_n)^{-1}] + \\
&\frac{Q}{2}[\gamma_1(\lambda_1(E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \lambda_1'(E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}) + \gamma_2(\lambda_2(E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2'(E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}) \\
&+ \dots + \gamma_n(\lambda_n(E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n'(E_n^{-1} - \mu_n')^{-1})]\}^\Gamma + C_e \tag{5.70}
\end{aligned}$$

$$S.a: \quad 1 - [(1 - E a_1)(1 - E a_2) \dots (1 - E a_n)(1 - E_1)(1 - E_2) \dots (1 - E_n)] \geq E_d$$

$$0 \leq E a_1 \leq 1; \quad 0 \leq E a_2 \leq 1; \quad \dots \quad 0 \leq E a_n \leq 1;$$

$$0 \leq E_1 \leq 1; \quad 0 \leq E_2 \leq 1; \quad \dots \quad 0 \leq E_n \leq 1.$$

O programa, além de calcular o custo mínimo do sistema de tratamento de lagoas de estabilização durante um horizonte de planejamento, determina a eficiência média de cada lagoa dos parâmetros analisados.

Assim, para se saber a verdadeira eficiência de remoção de cada parâmetro utilizado no modelo e de cada lagoa, deve-se determinar o tempo médio através das seguintes equações:

- lagoas anaeróbias

$$ta_1^* = \lambda a_1 (Ea_1^{-1} F_1 - \mu a_1)^{-1} \quad (5.71)$$

$$ta_2^* = \lambda a_2 (Ea_2^{-1} F_2 - \mu a_2)^{-1} \quad (5.72)$$

.....

$$ta_n^* = \lambda a_n (Ea_n^{-1} F_n - \mu a_n)^{-1} \quad (5.73)$$

- lagoas facultativas e de aguapés

$$t_1^* = \frac{1}{2} [\lambda_1 (E_1^{-1} - \mu_1)^{-1} + \lambda_1' (E_1^{-1} - \mu_1')^{-1}] \quad (5.74)$$

$$t_2^* = \frac{1}{2} [\lambda_2 (E_2^{-1} - \mu_2)^{-1} + \lambda_2' (E_2^{-1} - \mu_2')^{-1}] \quad (5.75)$$

.....

$$t_n^* = \frac{1}{2} [\lambda_n (E_n^{-1} - \mu_n)^{-1} + \lambda_n' (E_n^{-1} - \mu_n')^{-1}] \quad (5.76)$$

Substituindo-se os valores de  $ta_1^*$ ,  $ta_2^*$  e  $ta_n^*$  (lagoas anaeróbias) nas equações (5.47), (5.48) e (5.49), respectivamente, e os valores de  $t_1^*$ ,  $t_2^*$  e  $t_n^*$  (lagoas facultativas e de aguapés) nas equações (5.50), (5.51) e (5.52), respectivamente, obtém-se a eficiência de cada parâmetro utilizado e de cada lagoa.

Finalmente, substituindo-se as eficiências acima obtidas nas equações (5.57), (5.58) e (5.59), para as lagoas anaeróbias, e (5.60), (5.61) e (5.62), respectivamente, obtém-se o volume de cada lagoa.

## 5.6. Modelo matemático de custos após a obtenção das constantes

### 5.6.1. Modelo de escavação mecânica da terra

A partir dos dados obtidos junto ao CIDASC (Centro Integrado de Desenvolvimento Agropecuário de Santa Catarina), situado no município de Concórdia/SC, como mostra o Quadro IV.1, anexo IV, o modelo ajustado, após calculadas as constantes de custos de escavação mecânica e acerto de taludes, é uma função não linear, a qual está apresentada pela equação abaixo:

$$C_{em} = 5,514 V^{0,678} \quad (5.77)$$

Os resultados estimados pelo modelo para escavação mecânica e acerto de taludes das lagoas podem ser comparados com os observados na Figura 5.4.

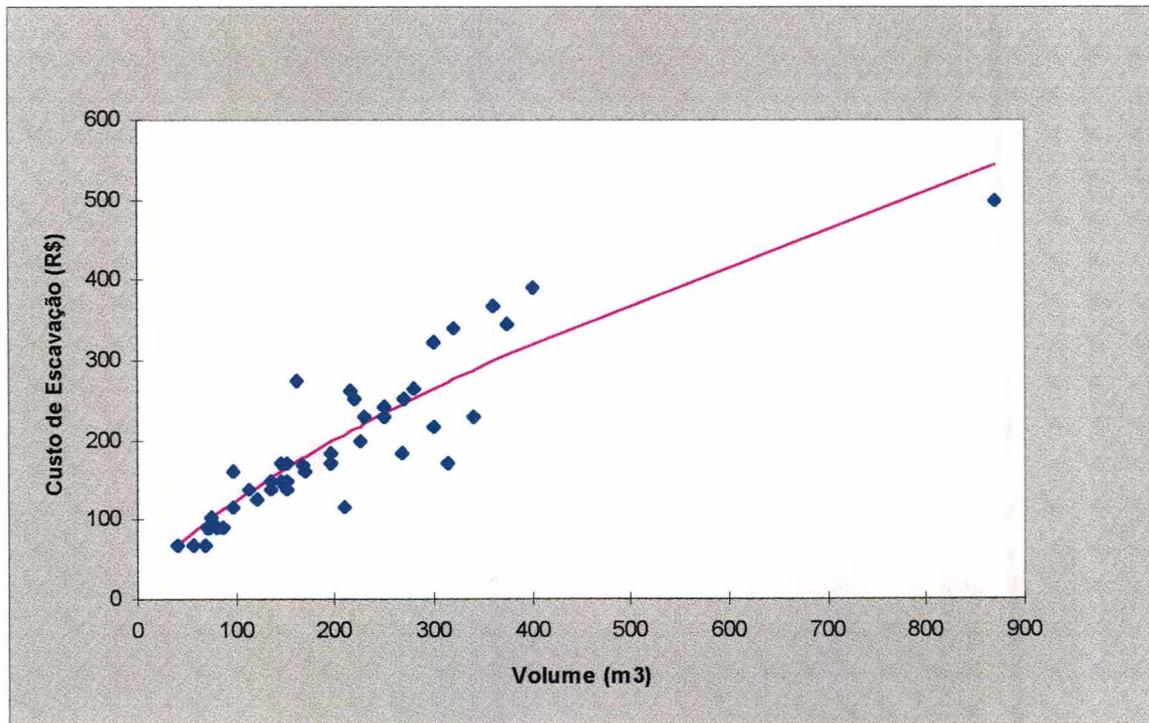


Fig. 5.4 - Custos (---) estimados e (□) orçados de escavação mecânica a acerto de taludes praticados pelo CIDASC - Centro Integrado de Desenvolvimento Agropecuário de Santa Catarina.

### 5.6.2. Modelo de revestimento das lagoas

Para o revestimento das lagoas, os dados foram obtidos junto a IRRIGATER (Irrigação e Meio Ambiente) com sede em Chapecó/SC, a qual efetua o revestimento das mesmas com vinimanta plástica de 0,5 mm, como mostra o Quadro IV.2, anexo IV. Os resultados de custos deste item analisados e plotados na Figura 5.5 também é uma função não linear. Neste caso, o modelo ajustado mais adequado após a obtenção das constantes para expressar o custo de revestimento das lagoas é representado pela equação:

$$C_{re} = 18,592 V^{0,732} \quad (5.78)$$

Neste modelo estão incluídos os custos da vinimanta e de colocação da mesma nas lagoas.

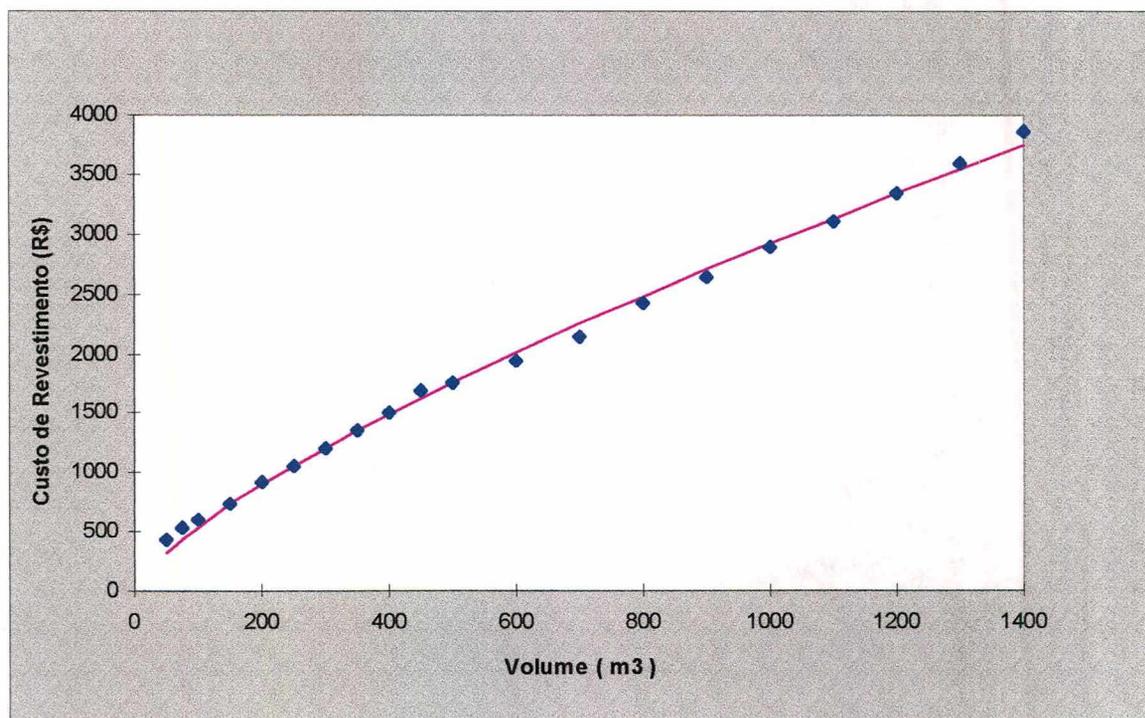


Fig. 5.5 - Custos (---) estimados e (□) orçados de revestimento das lagoas praticados pela IRRIGATER - Irrigação e Meio Ambiente.

### 5.6.3. Modelo de manutenção das lagoas

Baseados nos dados obtidos junto à TERRAPLENAGEM CANHANDUBA LTDA, com sede em Camboriú/SC, como apresenta a Quadro IV.3, anexo IV, o modelo definido para manutenção, conservação e limpeza de áreas adjacentes às lagoas, após determinadas as constantes para expressar o custo do sistema, é apresentado por:

$$C_{ma} = 0,164 A^{0,830} \quad (5.79)$$

Os resultados de custos estimados pelo modelo para manutenção e conservação das lagoas podem ser comparados com os observados, os quais estão plotados na Figura 5.6.

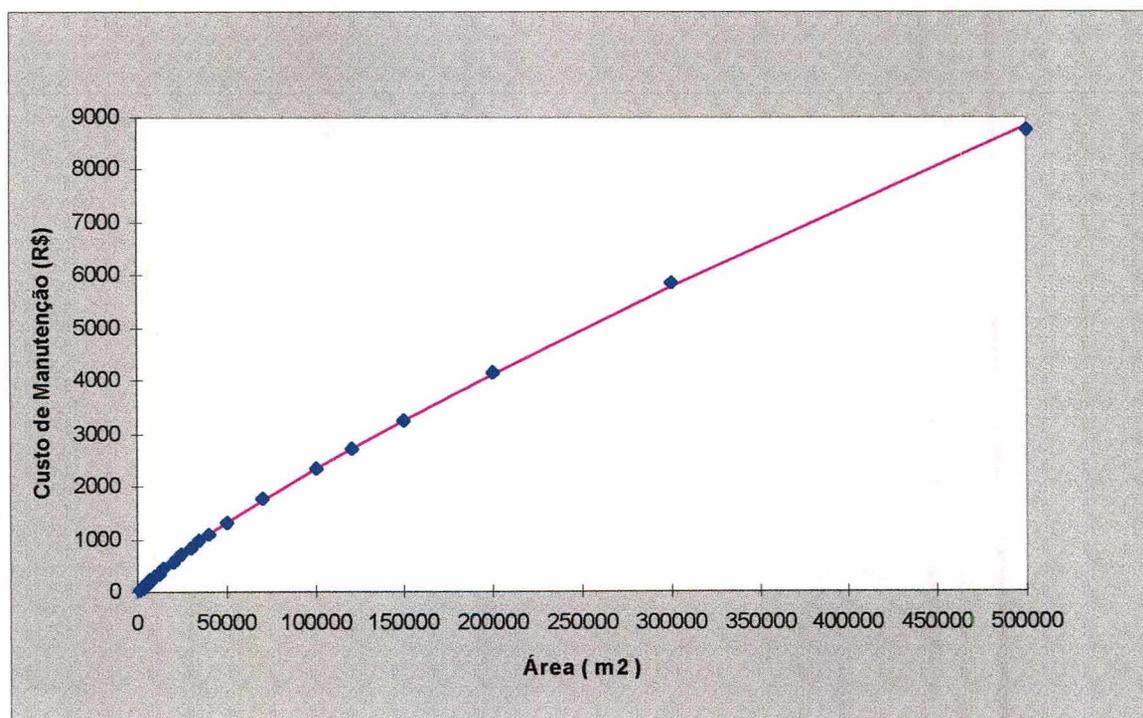


Fig. 5.6 - Custos (---) estimados e (□) orçados de manutenção e conservação do sistema de lagoas praticados pela TERRAPLENAGEM CANHANDUBA LTDA.

#### 5.6.4. Modelo de movimento da terra

Neste caso, o movimento da terra inclui: limpeza, escavação mecânica, acerto de taludes, transporte de terra excedente e compactação do solo (não sendo necessário o revestimento da lagoa). Os dados foram obtidos junto à TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA, (Camboriú/SC), como apresenta o Quadro IV.4, anexo IV. Os resultados de custos de movimento da terra em função do volume estão plotados na Figura 5.7, e o modelo ajustado foi definido através da seguinte equação:

$$C_{mt} = 5,914 V^{0,950} \quad (5.80)$$

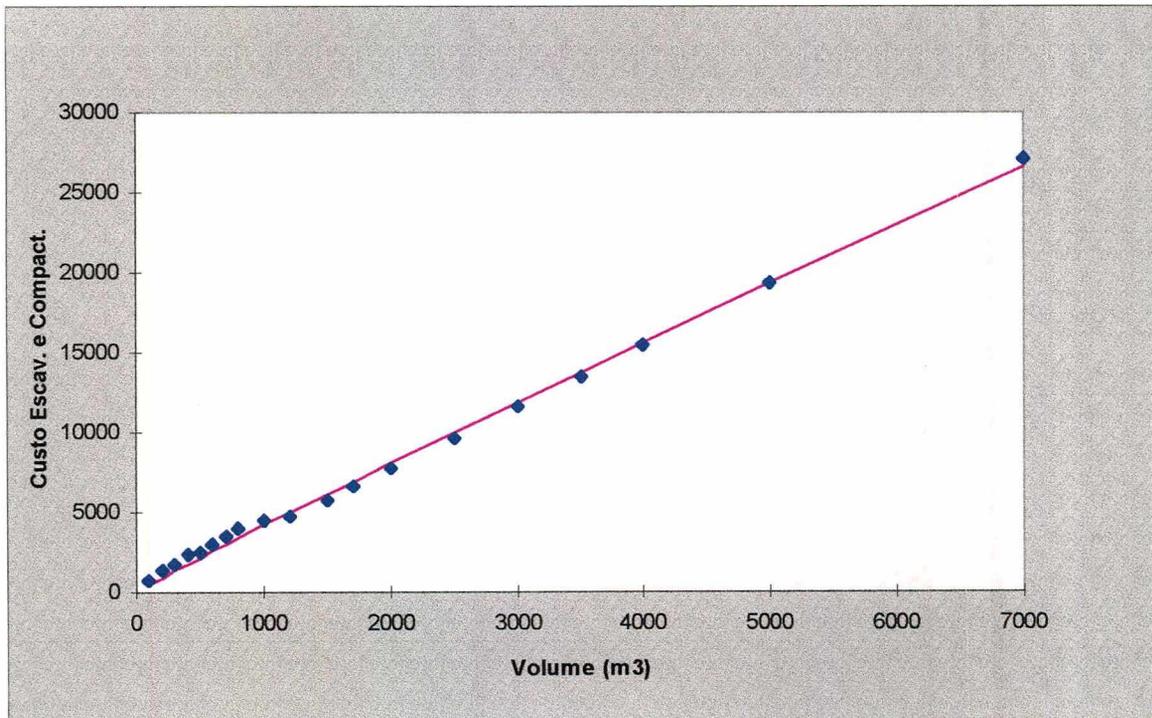


Fig. 5.7 - Custos (---) estimados e (□) orçados de escavação mecânica e compactação das lagoas praticados pela TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.

Convém ressaltar que através de pesquisas realizadas junto às principais Empreiteiras de Obras de Terraplanagem, tanto em Londrina/Pr quanto em Maringá/Pr, os dados sobre movimentação de terra, tais como: limpeza do terreno, escavação mecânica e compactação destas Empresas acompanham os dados da Empresa de Camboriú/SC.

### **5.7. Análise econômica**

Dentro dos objetivos do presente trabalho, destaca-se um estudo econômico de sistemas de lagoas de estabilização que tratam dejetos de suínos, apresentando custos de implantação e operação, assim como a implicação dos custos unitários.

*A implantação do sistema é caracterizada através dos custos de investimento inicial como:*

- a) aquisição ou desapropriação da área de terra ocupada pelo sistema de lagoas. Neste custo foi contabilizado 100% a mais da área útil das lagoas para circulação de pessoas e/ou veículos;
- b) escavação mecânica e terraplanagem do sistema; este tipo de investimento compreende a limpeza do terreno, escavação mecânica, construção de taludes, transporte e descarga de terra excedente e compactação ou revestimento das lagoas.

*O custo de operação do sistema de tratamento está vinculado à manutenção do mesmo. Tal custo é estimado com base no número mínimo de pessoas necessárias para limpeza da área total. Assim, os suinocultores terão despesas mensais com seus servidores durante um horizonte de planejamento. Através dos experimentos efetuados no CNPSA para tratamento de dejetos suínos, constatou-se uma camada de lodo em torno de 10 a 15 cm na lagoa LA1 formada durante os 20 meses do experimento. Neste caso, para efeito de estudo, deve-se considerar um período de aproximadamente 10 anos, estando de acordo com Yang et al (1997). Para uniformidade de datas, os custos mensais serão contabilizados na data presente do*

investimento através da equação (5.10). Portanto, o custo total é caracterizado pela soma dos custos de implantação e de operação do sistema de tratamento.

### 5.8. Custo unitário por suíno

De acordo com a referência ASAE (1993), a DBO<sub>5</sub> per capita é de 189 (g/suíno/dia), com peso de 61 kg. Assim, sabendo-se a concentração média de DBO<sub>5</sub> ( mg/l ou kg/m<sup>3</sup>) e a vazão (m<sup>3</sup>/dia), obtém-se a população, ou seja, o número de suínos que o sistema comporta para tratamento de seus resíduos.

De posse do custo total, dado pela otimização do sistema, da taxa de juro anual e da vida útil do sistema de tratamento, obtém-se o custo anual através da seguinte equação:

$$C_a = C_T \left[ \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \right] \quad (5.81)$$

onde:

$C_a$  é o custo anual do sistema, em R\$;

$C_T$  é o custo total do sistema, em R\$;

$n$  é o tempo de vida útil do sistema, em anos;

$r$  é a taxa de juro anual.

Assim, o custo unitário por suíno é caracterizado pela razão entre o custo anual do sistema e o número de suínos que o mesmo comporta para tratamento de seus dejetos.

**OBS:** Na otimalidade do programa utilizou-se o algoritmo de **Hooke Jeeves** com função de penalidades. O algoritmo converge rapidamente com tempo de resolução inferior a 30 segundos em um computador 486-DX2-66.

## CAPÍTULO 6

### 6. APLICAÇÕES

Através dos resultados médios observados dos afluentes e efluentes em termos de **DBO** de cada lagoa, bem como o tempo de detenção das mesmas, os coeficientes  $k$  foram determinados para as lagoas anaeróbias, facultativa e de aguapés, admitindo-se a cinética de primeira ordem e utilizando-se o modelo de mistura completa. Os valores de  $k$  foram:  $0,101 \text{ d}^{-1}$  para LA1,  $0,038 \text{ d}^{-1}$  para LA2,  $0,038 \text{ d}^{-1}$  para LF e  $0,059 \text{ d}^{-1}$  para LAG. Dessa forma, as eficiências das referidas lagoas com relação ao tempo de detenção dadas pelas equações (5.11) a (5.13), tornam-se:

$$E_1 = (1 + 9,9/t_1)^{-1} \text{ para a lagoa LA1;}$$

$$E_2 = (1 + 26,3/t_2)^{-1} \text{ para a lagoa LA2;}$$

$$E_3 = (1 + 26,3/t_3)^{-1} \text{ para a lagoa LF;}$$

$$E_4 = (1 + 16,9/t_4)^{-1} \text{ para a lagoa LAG.}$$

Neste caso,  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 1$  e  $\lambda_1 = 9,9 \text{ d}$ ;  $\lambda_2 = 26,3 \text{ d}$ ;  $\lambda_3 = 26,3 \text{ d}$ ;  $\lambda_4 = 16,9 \text{ d}$ .

As Figuras V.1 a V.4, anexo V apresentam a eficiência da DBO com a variação do tempo de detenção para as lagoas LA1, LA2, LF e LAG.

Os modelos matemáticos de custos de escavação mecânica e de revestimento das lagoas dadas pelas equações (5.77) e (5.78), respectivamente, são:

$$C_{em} = 5,514 V^{0,678},$$

$$C_{re} = 18,592 V^{0,732}.$$

Fazendo-se um estudo para 10 anos e admitindo-se taxa de juros de 15% ao ano, os custos mensais estimados de manutenção do sistema de tratamento de dejetos suínos, computados na data presente do investimento pelas equações (5.79) e (5.32), se reduzem em:

$$C_{ma} = 0,164 A^{0,830} \quad \Rightarrow \quad C_{ma} = 0,164 (\gamma V)^{0,830}$$

$$\phi = 64,3$$

**Custo de retirada dos aguapés:** conforme discutido no item 4.2.6, os aguapés necessitam de um espaço livre para crescerem (70%), caso contrário sua produtividade diminui e conseqüentemente a eficiência no tratamento dos dejetos. A ocupação da superfície pelas plantas se dá com taxas de crescimento de 5% ao dia, assim em torno de 15 dias duplica-se a área superficial ocupada por elas. Conclui-se, portanto, que a cada 15 dias devem ser retiradas 50% dessas plantas da lagoa.

Estudos efetuados na lagoa de aguapés contendo uma área superficial de 100 m<sup>2</sup> na UNETDS do CNPSA revelam que para retirar 50 m<sup>2</sup> dessas plantas gastam-se em torno de 2 horas. Retirando-se duas vezes por mês necessitam de 4 horas, ou seja, meio dia. Comparando-se, a grosso modo, o modelo de custo de manutenção das lagoas (eq. 5.79) com o custo horário de um servidor para o empregador (Medri et al 1996b), observa-se que o custo de manutenção da lagoa de aguapés é aproximadamente o dobro de uma outra lagoa contendo a mesma área. Ressalta-se, no entanto, a necessidade de se fazer um estudo mais detalhado sobre o custo de retirada dos aguapés, o que não era um objetivo central deste trabalho.

De acordo com o Mercado Agrícola (1997), o valor do terreno na Região Oeste Catarinense é de aproximadamente R\$ 3.000,00/ha. Supondo-se uma relação entre a área superficial e o volume como sendo igual a  $\gamma_1 = 0,8$ ;  $\gamma_2 = 0,65$ ;  $\gamma_3 = 1,10$  e  $\gamma_4 = 1,10$  m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, respectivamente para as lagoas LA1 e LA2, LF e LAG, e admitindo-se que o suinocultor deseja apenas a **remoção da matéria orgânica (DBO)**, o modelo de minimização de custos dado pela equação (5.46), torna-se:

$$\begin{aligned}
\text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 16,9 (X_4^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 16,9 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 16,9 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& 64,3 \times 0,164 \{Q [0,80 \times 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1} + 0,65 \times 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1} + \\
& 1,10 \times 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1} + 2^{(1/0,830)} 1,10 \times 16,9 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,830}
\end{aligned}$$

$$\text{s.a.} \quad 1 - (1 - X_1)(1 - X_2)(1 - X_3)(1 - X_4) \geq X_d \quad (\text{Eficiência desejada})$$

### Exemplo 1:

Quadro 6.1 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.

| Eficiência da lagoa      | Tempo detenção (dias)     | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| E <sub>1</sub> = 0,842   | t <sub>1</sub> = 53       | V <sub>1</sub> = 1.588            | A <sub>1</sub> = 1.270          |
| E <sub>2</sub> = 0,604   | t <sub>2</sub> = 40       | V <sub>2</sub> = 1.201            | A <sub>2</sub> = 781            |
| E <sub>3</sub> = 0,441   | t <sub>3</sub> = 21       | V <sub>3</sub> = 623              | A <sub>3</sub> = 685            |
| E <sub>4</sub> = 0,427   | t <sub>4</sub> = 13       | V <sub>4</sub> = 378              | A <sub>4</sub> = 415            |
| Custo da terra (R\$)     | Custo escavação (R\$)     | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| C <sub>t1</sub> = 914,68 | C <sub>em1</sub> = 815,91 | C <sub>re1</sub> = 4.095,89       | C <sub>ma1</sub> = 3.298,32     |
| C <sub>t2</sub> = 562,27 | C <sub>em2</sub> = 675,31 | C <sub>re2</sub> = 3.339,36       | C <sub>ma2</sub> = 2.027,51     |
| C <sub>t3</sub> = 493,42 | C <sub>em3</sub> = 432,64 | C <sub>re3</sub> = 2.064,87       | C <sub>ma3</sub> = 1.779,25     |
| C <sub>t4</sub> = 299,14 | C <sub>em4</sub> = 308,16 | C <sub>re4</sub> = 1.431,53       | C <sub>ma4</sub> = 2.157,39     |
| <b>Total: 2.269,51</b>   | <b>2.232,02</b>           | <b>10.931,65</b>                  | <b>9.262,47</b>                 |

**Custo Total do Sistema: R\$ 24.695,65**

**Exemplo 2:**

Quadro 6.2 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.

| Eficiência da lagoa    | Tempo detenção (dias) | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $E_1 = 0,842$          | $t_1 = 53$            | $V_1 = 2.647$                     | $A_1 = 2.117$                   |
| $E_2 = 0,607$          | $t_2 = 41$            | $V_2 = 2.026$                     | $A_2 = 1.317$                   |
| $E_3 = 0,440$          | $t_3 = 21$            | $V_3 = 1.035$                     | $A_3 = 1.139$                   |
| $E_4 = 0,424$          | $t_4 = 12$            | $V_4 = 621$                       | $A_4 = 1.366$                   |
| Custo da terra (R\$)   | Custo escavação (R\$) | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| $C_{t1} = 1.524,57$    | $C_{em1} = 1.153,65$  | $C_{re1} = 5.953,35$              | $C_{ma1} = 5.020,41$            |
| $C_{t2} = 948,21$      | $C_{em2} = 962,46$    | $C_{re2} = 4.895,53$              | $C_{ma2} = 3.122,43$            |
| $C_{t3} = 819,81$      | $C_{em3} = 610,42$    | $C_{re3} = 2.994,30$              | $C_{ma3} = 2.699,61$            |
| $C_{t4} = 491,83$      | $C_{em4} = 431,70$    | $C_{re4} = 2.060,00$              | $C_{ma4} = 3.239,17$            |
| <b>Total: 3.784,42</b> | <b>3.158,23</b>       | <b>15.903,18</b>                  | <b>14.081,62</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 36.927,45**

**Exemplo 3:**

Quadro 6.3 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 99%.

| Eficiência da lagoa    | Tempo detenção (dias) | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $E_1 = 0,866$          | $t_1 = 64$            | $V_1 = 1.912$                     | $A_1 = 1.529$                   |
| $E_2 = 0,667$          | $t_2 = 53$            | $V_2 = 1.577$                     | $A_2 = 1.025$                   |
| $E_3 = 0,535$          | $t_3 = 30$            | $V_3 = 907$                       | $A_3 = 998$                     |
| $E_4 = 0,521$          | $t_4 = 18$            | $V_4 = 551$                       | $A_4 = 606$                     |
| Custo da terra (R\$)   | Custo escavação (R\$) | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| $C_{t1} = 1.101,09$    | $C_{em1} = 925,24$    | $C_{re1} = 4.691,48$              | $C_{ma1} = 3.784,49$            |
| $C_{t2} = 738,09$      | $C_{em2} = 812,11$    | $C_{re2} = 4.075,31$              | $C_{ma2} = 2.536,84$            |
| $C_{t3} = 718,60$      | $C_{em3} = 558,25$    | $C_{re3} = 2.718,99$              | $C_{ma3} = 2.469,87$            |
| $C_{t4} = 435,96$      | $C_{em4} = 397,81$    | $C_{re4} = 1.885,96$              | $C_{ma4} = 2.996,82$            |
| <b>Total: 2.993,74</b> | <b>2.693,41</b>       | <b>13.371,74</b>                  | <b>11.788,02</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 30.846,91**

**Exemplo 4:**

No caso de não se considerar os custos para retirar os aguapés, tem-se:

Quadro 6.4 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, porém sem considerar os custos para retirar os aguapés e admitindo-se vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.

| Eficiência da lagoa        | Tempo detenção (dias)       | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| E <sub>1</sub> = 0,822     | t <sub>1</sub> = 46         | V <sub>1</sub> = 2.293            | A <sub>1</sub> = 1.835          |
| E <sub>2</sub> = 0,550     | t <sub>2</sub> = 32         | V <sub>2</sub> = 1.606            | A <sub>2</sub> = 1.044          |
| E <sub>3</sub> = 0,349     | t <sub>3</sub> = 14         | V <sub>3</sub> = 705              | A <sub>3</sub> = 776            |
| E <sub>4</sub> = 0,616     | t <sub>4</sub> = 27         | V <sub>4</sub> = 1.353            | A <sub>4</sub> = 1.488          |
| Custo da terra (R\$)       | Custo escavação (R\$)       | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| C <sub>t1</sub> = 1.320,89 | C <sub>em1</sub> = 1.046,76 | C <sub>re1</sub> = 5.360,08       | C <sub>ma1</sub> = 4.305,60     |
| C <sub>t2</sub> = 751,56   | C <sub>em2</sub> = 822,15   | C <sub>re2</sub> = 4.129,65       | C <sub>ma2</sub> = 2.449,81     |
| C <sub>t3</sub> = 558,58   | C <sub>em3</sub> = 470,60   | C <sub>re3</sub> = 2.261,12       | C <sub>ma3</sub> = 1.820,75     |
| C <sub>t4</sub> = 1.071,52 | C <sub>em4</sub> = 731,93   | C <sub>re4</sub> = 3.642,68       | C <sub>ma4</sub> = 3.492,76     |
| <b>Total: 3.702,55</b>     | <b>3.071,44</b>             | <b>15.393,53</b>                  | <b>12.068,92</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 34.236,44**

**Exemplo 5:**

Considerando-se, agora, duas lagoas anaeróbias, duas facultativas e uma de aguapés, cujos dados são os obtidos no CNPSA/EMBRAPA. Neste caso, a função objetivo toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
\text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (X_4^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 16,9 (X_5^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 16,9 (X_5^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 16,9 (X_5^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& 64,3 \times 0,164 \{ [Q \ 0,80 \times 9,9 (X_1^{-1} - 1)^{-1}] + [Q \ 0,65 \times 26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1}] + [Q \ 1,10 \times 26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1}] + \\
& [Q \ 1,10 \times 26,3 (X_4^{-1} - 1)^{-1}] + 2^{(1/0,830)} [Q \ 1,10 \times 16,9 (X_5^{-1} - 1)^{-1}] \}^{0,830}
\end{aligned}$$

s.a.  $1 - (1 - X_1)(1 - X_2)(1 - X_3)(1 - X_4)(1 - X_5) \geq X_d$  (Eficiência desejada)

Quadro 6.5 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.

| Eficiência da lagoa      | Tempo detenção (dias)     | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| E <sub>1</sub> = 0,826   | t <sub>1</sub> = 47       | V <sub>1</sub> = 1.408            | A <sub>1</sub> = 1.127          |
| E <sub>2</sub> = 0,556   | t <sub>2</sub> = 33       | V <sub>2</sub> = 986              | A <sub>2</sub> = 641            |
| E <sub>3</sub> = 0,366   | t <sub>3</sub> = 15       | V <sub>3</sub> = 455              | A <sub>3</sub> = 500            |
| E <sub>4</sub> = 0,366   | t <sub>4</sub> = 15       | V <sub>4</sub> = 455              | A <sub>4</sub> = 500            |
| E <sub>5</sub> = 0,358   | t <sub>5</sub> = 9        | V <sub>5</sub> = 282              | A <sub>5</sub> = 310            |
| Custo da terra (R\$)     | Custo escavação (R\$)     | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| C <sub>t1</sub> = 811,25 | C <sub>em1</sub> = 752,15 | C <sub>re1</sub> = 3.751,44       | C <sub>ma1</sub> = 2.929,86     |
| C <sub>t2</sub> = 461,62 | C <sub>em2</sub> = 590,77 | C <sub>re2</sub> = 2.890,40       | C <sub>ma2</sub> = 1.667,13     |
| C <sub>t3</sub> = 360,35 | C <sub>em3</sub> = 349,62 | C <sub>re3</sub> = 1.640,53       | C <sub>ma3</sub> = 1.301,43     |
| C <sub>t4</sub> = 360,35 | C <sub>em4</sub> = 349,62 | C <sub>re4</sub> = 1.640,53       | C <sub>ma4</sub> = 1.301,43     |
| C <sub>t5</sub> = 223,56 | C <sub>em5</sub> = 252,94 | C <sub>re5</sub> = 1.156,68       | C <sub>ma5</sub> = 1.614,78     |
| <b>Total: 2.217,13</b>   | <b>2.295,10</b>           | <b>11.079,58</b>                  | <b>8.814,63</b>                 |

**Custo Total do Sistema: R\$ 24.406,44**

**Exemplo 6:**

Considerando-se duas lagoas anaeróbias, três facultativas e uma de aguapés, tem-se:

Quadro 6.6 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%.

| <b>Eficiência da lagoa</b>  | <b>Tempo detenção (dias)</b> | <b>Volume da lagoa (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Área da lagoa (m<sup>2</sup>)</b> |
|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| E <sub>1</sub> = 0,815      | t <sub>1</sub> = 44          | V <sub>1</sub> = 1.311                 | A <sub>1</sub> = 1.049               |
| E <sub>2</sub> = 0,524      | t <sub>2</sub> = 29          | V <sub>2</sub> = 867                   | A <sub>2</sub> = 564                 |
| E <sub>3</sub> = 0,310      | t <sub>3</sub> = 12          | V <sub>3</sub> = 354                   | A <sub>3</sub> = 389                 |
| E <sub>4</sub> = 0,310      | t <sub>4</sub> = 12          | V <sub>4</sub> = 354                   | A <sub>4</sub> = 389                 |
| E <sub>5</sub> = 0,310      | t <sub>5</sub> = 12          | V <sub>5</sub> = 354                   | A <sub>5</sub> = 389                 |
| E <sub>6</sub> = 0,309      | t <sub>6</sub> = 8           | V <sub>6</sub> = 227                   | A <sub>6</sub> = 250                 |
| <b>Custo da terra (R\$)</b> | <b>Custo escavação (R\$)</b> | <b>Custo revestimento (R\$)</b>        | <b>Custo manutenção (R\$)</b>        |
| C <sub>t1</sub> = 754,92    | C <sub>em1</sub> = 716,33    | C <sub>re1</sub> = 3.558,92            | C <sub>ma1</sub> = 2.729,60          |
| C <sub>t2</sub> = 405,87    | C <sub>em2</sub> = 541,41    | C <sub>re2</sub> = 2.630,53            | C <sub>ma2</sub> = 1.467,52          |
| C <sub>t3</sub> = 280,30    | C <sub>em3</sub> = 294,87    | C <sub>re3</sub> = 1.364,97            | C <sub>ma3</sub> = 1.013,51          |
| C <sub>t4</sub> = 280,30    | C <sub>em4</sub> = 294,87    | C <sub>re4</sub> = 1.364,97            | C <sub>ma4</sub> = 1.013,51          |
| C <sub>t5</sub> = 280,30    | C <sub>em5</sub> = 294,87    | C <sub>re5</sub> = 1.364,97            | C <sub>ma5</sub> = 1.013,51          |
| C <sub>t6</sub> = 179,79    | C <sub>em6</sub> = 218,20    | C <sub>re6</sub> = 986,15              | C <sub>ma6</sub> = 1.300,14          |
| <b>Total: 2.181,48</b>      | <b>2.360,54</b>              | <b>11.270,52</b>                       | <b>8.537,80</b>                      |

**Custo Total do Sistema: R\$ 24.350,34**

Os dois parâmetros fundamentais encontrados para projetos de lagoas que tratam dejetos suínos, como já foram mencionados, são a **DBO** e o **Nitrogênio**.

Como já foi enfatizado no item 5.5.1, a remoção do Nitrogênio nas lagoas anaeróbias é reduzida. Dessa forma, da equação (5.47) a (5.48) obtém-se as eficiências da **DBO** para as lagoas anaeróbias. No entanto, existem fatores “ $F_i$ ” de calibração para cada lagoa anaeróbia. Esses valores são próximos a 0,7 ou 0,8, os quais regulam a eficiência do sistema requerida, pois à medida que esses valores abaixam, as eficiências das referidas lagoas diminuem (lagoas anaeróbias) e, conseqüentemente, as eficiências das lagoas subseqüentes aumentam (lagoas facultativas e/ou aguapés), para uma certa eficiência do sistema desejada. As constantes para as lagoas anaeróbias são:  $\mu_{a1} = \mu_{a2} = 1$ , e  $\lambda_{a1} = 26,3$  d e  $\lambda_{a2} = 16,9$  d, para a DBO.

Considerando-se as constantes de degradação do *Nitrogênio* nas lagoas facultativa ( $k = 0,060$  d<sup>-1</sup>) e de aguapés ( $k = 0,074$  d<sup>-1</sup>), as eficiências das lagoas LF e LAG com relação à variação ao tempo de detenção dadas pelas equações (5.50) a (5.52), tornam-se:

$$E_1 = (1 + 16,7/t_1)^{-1} \text{ para a lagoa LF;}$$

$$E_2 = (1 + 13,5/t_2)^{-1} \text{ para a lagoa LAG.}$$

Onde,  $\mu_1' = \mu_2' = 1$ , e  $\lambda_1' = 16,7$  d<sup>-1</sup> e  $\lambda_2' = 13,5$  d<sup>-1</sup>.

As Figuras V.5 e V.6 anexo V mostram a eficiência do Nitrogênio com a variação do tempo de detenção para as lagoas facultativa e de aguapés.

Dessa forma, o modelo de minimização de custos dado pela equação (5.70) e considerando-se as quatro lagoas do CNPSA, toma o seguinte aspecto:

$$\begin{aligned}
\text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
& 18,592 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
& Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + \\
& 16,7 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
& Q/2[16,9(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 13,5(X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[16,9(X_2^{-1} - 1)^{-1} + \\
& 13,5 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[16,9(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
& 64,3 \times 0,164 \{Q [ 0,80 \times 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1} + 0,65 \times 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] + \\
& Q/2 [1,10 ( 26,3 (X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}) + \\
& 2^{(1/0,83)} \times 1,10 (16,9(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_2^{-1} - 1)^{-1})]\}^{0,830}
\end{aligned}$$

**s.a.**  $1 - (1 - X_{a1})(1 - X_{a2})(1 - X_1)(1 - X_2) \geq X_d$  (Eficiência desejada)

**Exemplo 7:**

Quadro 6.7 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .

| Eficiência da lagoa    | Tempo detenção (dias) | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $E_1 = 0,501$          | $t_1 = 25$            | $V_1 = 747$                       | $A_1 = 597$                     |
| $E_2 = 0,467$          | $t_2 = 37$            | $V_2 = 1.109$                     | $A_2 = 721$                     |
| $E_3 = 0,746$          | $t_3 = 63$            | $V_3 = 1.890$                     | $A_3 = 2.079$                   |
| $E_4 = 0,704$          | $t_4 = 36$            | $V_4 = 1.086$                     | $A_4 = 1.195$                   |
| Custo da terra (R\$)   | Custo escavação (R\$) | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| $C_{t1} = 430,00$      | $C_{em1} = 489,09$    | $C_{re1} = 2.357,20$              | $C_{ma1} = 1.462,26$            |
| $C_{t2} = 518,97$      | $C_{em2} = 639,60$    | $C_{re2} = 3.149,15$              | $C_{ma2} = 1.764,82$            |
| $C_{t3} = 1.497,06$    | $C_{em3} = 918,21$    | $C_{re3} = 4.653,01$              | $C_{ma3} = 5.090,89$            |
| $C_{t4} = 860,29$      | $C_{em4} = 630,70$    | $C_{re4} = 3.101,84$              | $C_{ma4} = 5.851,01$            |
| <b>Total: 3.306,32</b> | <b>2.677,60</b>       | <b>13.261,20</b>                  | <b>14.168,98</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 33.414,10**

Os resultados obtidos com a calibração do modelo, para as condições acima especificadas, são os seguintes:

|            | L A G O A S |       |       |       |              |
|------------|-------------|-------|-------|-------|--------------|
| Eficiência | LA1         | LA2   | LF    | LAG   | Total        |
| DBO        | 0,715       | 0,854 | 0,706 | 0,682 | <b>0,989</b> |
| NT         | 0,200       | 0,200 | 0,790 | 0,728 | <b>0,964</b> |

**Obs:** Para efeito de cálculo, a remoção do Nitrogênio nas lagoas anaeróbicas será considerada de 20% para cada uma delas, se o tempo de detenção for maior que 20 dias; caso contrário, será de 10%.

**Exemplo 8:**

Considerando-se duas lagoas anaeróbias, duas facultativas e uma de aguapés, cujos dados são os obtidos no CNPSA/EMBRAPA. Neste caso, a função objetivo toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
 & 18,592 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
 & [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
 & 18,592 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
 & Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 16,7 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & Q/2[26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 16,7 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2 [26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & Q/2[16,9(X_3^{-1} - 1)^{-1} + 13,5(X_3^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[16,9(X_3^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 13,5 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[16,9(X_3^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & 64,3 \times 0,164 \{Q [ 0,80 \times 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1} + 0,65 \times 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] + \\
 & Q/2[1,10(26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}) + 1,10(26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}) + \\
 & 2^{(1/0,83)} \times 1,10 (16,9(X_3^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_3^{-1} - 1)^{-1})]\}^{0,830}
 \end{aligned}$$

$$\text{s.a.} \quad 1 - (1 - X_{a1}) (1 - X_{a2}) (1 - X_1) (1 - X_2) (1 - X_3) \geq X_d \text{ (Eficiência desejada)}$$

Quadro 6.8 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .

| Eficiência da lagoa    | Tempo detenção (dias) | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $E_1 = 0,452$          | $t_1 = 18$            | $V_1 = 540$                       | $A_1 = 432$                     |
| $E_2 = 0,355$          | $t_2 = 21$            | $V_2 = 630$                       | $A_2 = 410$                     |
| $E_3 = 0,634$          | $t_3 = 37$            | $V_3 = 1.116$                     | $A_3 = 1.228$                   |
| $E_4 = 0,634$          | $t_4 = 37$            | $V_4 = 1.116$                     | $A_4 = 1.228$                   |
| $E_5 = 0,578$          | $t_5 = 21$            | $V_5 = 625$                       | $A_5 = 688$                     |
| Custo da terra (R\$)   | Custo escavação (R\$) | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| $C_{t1} = 310,89$      | $C_{em1} = 392,55$    | $C_{re1} = 1.859,04$              | $C_{ma1} = 1.078,71$            |
| $C_{t2} = 294,96$      | $C_{em2} = 436,06$    | $C_{re2} = 2.082,46$              | $C_{ma2} = 1.023,43$            |
| $C_{t3} = 884,08$      | $C_{em3} = 642,46$    | $C_{re3} = 3.164,38$              | $C_{ma3} = 3.067,47$            |
| $C_{t4} = 884,08$      | $C_{em4} = 642,46$    | $C_{re4} = 3.164,38$              | $C_{ma4} = 3.067,47$            |
| $C_{t5} = 495,23$      | $C_{em5} = 433,73$    | $C_{re5} = 2.070,42$              | $C_{ma5} = 3.436,58$            |
| <b>Total: 2.869,24</b> | <b>2.547,26</b>       | <b>12.340,68</b>                  | <b>11.673,66</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 29.430,84**

Os resultados obtidos, para essas condições são:

|            | L A G O A S |       |       |       |       |              |
|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Eficiência | LA1         | LA2   | LF1   | LF2   | LAG   | Total        |
| DBO        | 0,645       | 0,444 | 0,586 | 0,586 | 0,552 | <b>0,985</b> |
| NT         | 0,100       | 0,200 | 0,690 | 0,690 | 0,607 | <b>0,973</b> |

**Exemplo 9:**

Considerando-se, agora, duas lagoas anaeróbias, três facultativas e uma de aguapés, cujos dados são os obtidos no CNPSA/EMBRAPA. Neste caso, a função objetivo toma a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
 & 18,592 [Q \ 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
 & [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,514 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,678} + \\
 & 18,592 [Q \ 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}]^{0,732} + \\
 & Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 16,7 (X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & Q/2[26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 16,7 (X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2 [26,3 (X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & Q/2[26,3(X_3^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_3^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[26,3(X_3^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 16,7 (X_3^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2 [26,3 (X_3^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_3^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & Q/2[16,9(X_4^{-1} - 1)^{-1} + 13,5(X_4^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,514 \{Q/2[16,9(X_4^{-1} - 1)^{-1} + \\
 & 13,5 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,678} + 18,592 \{Q/2[16,9(X_4^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_4^{-1} - 1)^{-1}]\}^{0,732} + \\
 & 64,3 \times 0,164 \{Q [0,80 \times 9,9 (F_1 X_{a1}^{-1} - 1)^{-1} + 0,65 \times 26,3 (F_2 X_{a2}^{-1} - 1)^{-1}] + \\
 & Q/2[1,10(26,3(X_1^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_1^{-1} - 1)^{-1}) + 1,10(26,3(X_2^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_2^{-1} - 1)^{-1}) + \\
 & 1,10 (26,3(X_3^{-1} - 1)^{-1} + 16,7(X_3^{-1} - 1)^{-1}) + \\
 & 2^{(1/0,83)} \times 1,10 (16,9(X_4^{-1} - 1)^{-1} + 13,5 (X_4^{-1} - 1)^{-1})\}^{0,830}
 \end{aligned}$$

$$\text{s.a.} \quad 1 - (1 - X_{a1}) (1 - X_{a2}) (1 - X_1) (1 - X_2) (1 - X_3) (1 - X_4) \geq X_d \text{ (Eficiência desejada)}$$

Quadro 6.9 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento das lagoas e de manutenção do sistema, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98%, considerando-se  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ .

| Eficiência da lagoa    | Tempo detenção (dias) | Volume da lagoa (m <sup>3</sup> ) | Área da lagoa (m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| $E_1 = 0,419$          | $t_1 = 15$            | $V_1 = 442$                       | $A_1 = 354$                     |
| $E_2 = 0,263$          | $t_2 = 13$            | $V_2 = 386$                       | $A_2 = 251$                     |
| $E_3 = 0,551$          | $t_3 = 26$            | $V_3 = 790$                       | $A_3 = 870$                     |
| $E_4 = 0,551$          | $t_4 = 26$            | $V_4 = 790$                       | $A_4 = 870$                     |
| $E_5 = 0,551$          | $t_5 = 26$            | $V_5 = 790$                       | $A_5 = 870$                     |
| $E_6 = 0,486$          | $t_6 = 14$            | $V_6 = 430$                       | $A_6 = 473$                     |
| Custo da terra (R\$)   | Custo escavação (R\$) | Custo revestimento (R\$)          | Custo manutenção (R\$)          |
| $C_{t1} = 254,50$      | $C_{em1} = 342,73$    | $C_{re1} = 1.605,67$              | $C_{ma1} = 892,37$              |
| $C_{t2} = 180,59$      | $C_{em2} = 312,66$    | $C_{re2} = 1.454,13$              | $C_{ma2} = 633,22$              |
| $C_{t3} = 626,11$      | $C_{em3} = 508,46$    | $C_{re3} = 2.458,15$              | $C_{ma3} = 2.195,40$            |
| $C_{t4} = 626,09$      | $C_{em4} = 508,45$    | $C_{re4} = 2.458,09$              | $C_{ma4} = 2.195,33$            |
| $C_{t5} = 626,09$      | $C_{em5} = 508,45$    | $C_{re5} = 2.458,09$              | $C_{ma5} = 2.195,33$            |
| $C_{t6} = 340,93$      | $C_{em6} = 336,73$    | $C_{re6} = 1.575,33$              | $C_{ma6} = 2.390,88$            |
| <b>Total: 2.654,31</b> | <b>2.517,49</b>       | <b>12.009,46</b>                  | <b>10.502,52</b>                |

**Custo Total do Sistema: R\$ 27.683,79**

Os resultados obtidos, para essas condições são:

|            | L A G O A S |       |       |       |       |       |              |
|------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| Eficiência | LA1         | LA2   | LF1   | LF2   | LF3   | LAG   | Total        |
| DBO        | 0,598       | 0,328 | 0,500 | 0,500 | 0,500 | 0,459 | <b>0,982</b> |
| NT         | 0,100       | 0,100 | 0,612 | 0,612 | 0,612 | 0,515 | <b>0,977</b> |

### Exemplo 10

a) No exemplo 6, o custo total do sistema de lagoas para redução da DBO de 98%, com taxa de fluxo de 30 m<sup>3</sup>/dia, considerando-se a taxa de juros de 15% ao ano durante 10 anos foi de R\$ 24.350,34. De acordo com os suinocultores, a quantia de água residuária, em média, é de aproximadamente 10 litros/suíno/dia. Dessa forma, aplicando-se a equação (5.81), tem-se o custo unitário anual estimado por suíno, tal que:

$$C_a = 24.350,34 \left[ \frac{0,15(1 + 0,15)^{10}}{(1 + 0,15)^{10} - 1} \right]$$

$$C_a = \text{R\$ } 1,62 \text{ por suíno ao ano}$$

b) No exemplo 9, o custo total do sistema de lagoas para redução da *DBO* e do *Nitrogênio* em torno de 98%, com taxa de fluxo de 30 m<sup>3</sup>/dia, e com a mesma taxa de juros e vida útil da lagoa do exemplo acima foi de R\$ 27.683,79. Neste caso, o custo unitário anual estimado por suíno é de:

$$C_a = 27.683,79 \left[ \frac{0,15(1 + 0,15)^{10}}{(1 + 0,15)^{10} - 1} \right]$$

$$C_a = \text{R\$ } 1,84 \text{ por suíno ao ano.}$$

No anexo VI é apresentado um exemplo da viabilidade de se construir um sistema contendo quatro lagoas, sendo duas anaeróbias, uma facultativa e uma de aguapés, no qual não foi considerado o custo de revestimento das lagoas, mas sim o custo de escavação mecânica e compactação das mesmas.

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### *Conclusões:*

A suinocultura é uma atividade relevante para o Estado de Santa Catarina, ocupando o segundo lugar em importância econômica no Valor Bruto de Produção Agropecuária. Porém, os problemas ambientais decorrentes dessa atividade resultam num quadro crítico quanto à poluição dos dejetos provenientes das instalações suinícolas, demandando a busca de alternativas para solucioná-los, tais como: armazenamento dos dejetos em esterqueiras e bioesterqueiras para aproveitamento na lavoura ou tratamento com o uso de lagoas de estabilização, dentro de concepções econômicas.

Com o objetivo de otimizar o sistema de tratamento de dejetos suínos, construiu-se uma unidade experimental UNETDS - CNPSA/EMBRAPA, com lagoas em série que forneceram resultados, os quais permitiram a calibração de um modelo de minimização de custos.

Os resultados obtidos do sistema experimental de lagoas em série, consistindo de um decantador, duas lagoas anaeróbias, uma facultativa e uma de aguapés em fluxo contínuo, tratando dejetos de suínos, permitem concluir que:

- o tratamento de dejetos com elevadas concentrações de  $\text{DBO}_5$  (~ 12.000 mg/l), de sólidos totais (~ 17.000 mg/l), de fósforo (~ 600 mg/l) e de nitrogênio (~ 2.200 mg/l) pode ser efetuado através de lagoas de estabilização;

- o decantador de palhetas utilizado no estudo apresenta-se como um pré-tratamento na separação sólido/líquido fundamental para o desempenho das primeiras lagoas, pois, além de

evitar o assoreamento e a produção de maus odores causados por acúmulo de sólidos, proporciona a possibilidade do manejo separado do resíduo mais concentrado, viabilizando-o economicamente. A eficiência de remoção, nesta unidade de tratamento, observada para os parâmetros foi de 42% de ST; 30% de DQO; 31 % de DBO<sub>5</sub>; 17% de NT e 38% de PT;

- os parâmetros fundamentais para dimensionamento de lagoas que tratam dejetos suínos, para adequação do efluente às exigências dos padrões ambientais, são: DBO e Nitrogênio. Esses resíduos são altamente concentrados em matéria orgânica e nutrientes, e suas remoções ocorrem de maneira adversa em sistema de lagoas, ou seja, o primeiro é removido basicamente nas lagoas anaeróbias, e o segundo nas lagoas facultativas e, de uma forma otimizada, nas lagoas de aguapés;

- a eficiência de remoção da poluição carbonácea (DQO, DBO<sub>5</sub>) é feita principalmente na lagoa anaeróbia primária, com remoção de 78% de cada parâmetro, sendo completada nas lagoas anaeróbia secundária, facultativa e de aguapés, enquanto que o Nitrogênio é removido com mais intensidade nas lagoas facultativa e de aguapés, com 59% para ambas;

- a remoção dos nutrientes (NT, PT) ao longo do sistema de lagoas (LA1, LA2, LF e LAG) foi da ordem de 90% de NT e 93% de PT. O Fósforo foi removido basicamente na lagoa anaeróbia primária LA1 (64%), por sedimentação, enquanto que o Nitrogênio foi removido com maior eficiência na lagoa facultativa (59%), através da assimilação da amônia pelas algas, já que o pH (7,8) não se elevou suficientemente para favorecer a maior presença da amônia livre (NH<sub>3</sub>) no desprendimento para a atmosfera, e na lagoa de aguapés (59%) por processos de absorção pelas plantas;

- a eficiência da lagoa facultativa foi de 30% na remoção do PT e de 59% de NT, enquanto a lagoa de aguapés apresentou 54% de PT e 59% de NT. Conclui-se, portanto, que a lagoa de aguapés apresentou melhor desempenho, tanto do fósforo quanto do nitrogênio, já que o seu tempo de detenção foi menor;

- a eficiência de remoção combinada do sistema de lagoas (LA1, LA2, LF e LAG) foi da ordem de 87% de ST, 91% de SV; 97% de DQO e DBO<sub>5</sub>; 90% de NT; 93% de PT e de 99,99998% de CF. Acrescentando-se essas remoções com as do decantador, a eficiência do sistema subiu para 92% de ST; 95% de SV; 98% de DQO e DBO<sub>5</sub>; 92% de NT e 96% de PT;
- os resultados obtidos das lagoas LA1, LA2, LF e LAG foram excelentes para tão altas contagens de coliformes fecais. A totalidade do sistema apresentou remoção da ordem de 99,99998%, obtendo-se um efluente com  $3,7 \times 10^3$  NMP/100 ml de Coli Fecais. Isto traduz que, dependendo da classe do corpo receptor, não há necessidade de continuação do tratamento para este parâmetro;
- o regime hidráulico de fluxo disperso deve ser utilizado na modelagem de lagoas, principalmente quando a relação comprimento/largura for bem superior a 1. Na dificuldade de se obter o número de dispersão deste modelo, e quando as lagoas não forem predominantemente longitudinais, deve-se, então, utilizar o modelo de mistura completa, já que os valores médios das concentrações da matéria orgânica, dos sólidos e dos nutrientes ao longo do fluxo das lagoas mostraram-se quase idênticos;
- na determinação das constantes de degradação é importante que se mencione o modelo hidráulico utilizado, pois existem diferenças nos valores de k para os regimes hidráulicos;
- em sistemas de lagoas de estabilização em série, para tratamento de dejetos suínos, o valor da constante de degradação da DBO da lagoa anaeróbia primária é superior ao valor da lagoa anaeróbia secundária, por ser mais facilmente biodegradável, uma vez que a matéria orgânica remanescente torna-se mais resistente à biodegradação;
- os valores das constantes de degradação da DBO e do Nitrogênio para as lagoas foram:  $k$  (DOB<sub>5</sub>) = 0,101 d<sup>-1</sup> para a lagoa LA1 com 35 dias de detenção,  $k$  (DBO<sub>5</sub>) = 0,038 d<sup>-1</sup> para a lagoa LA2 com 46 dias de detenção,  $k$  (DBO<sub>5</sub>) = 0,038 d<sup>-1</sup> e  $k$  (NT) = 0,060 d<sup>-1</sup> para LF com 24 dias de detenção e  $k$  (DBO<sub>5</sub>) = 0,059 d<sup>-1</sup> e  $k$  (NT) = 0,074 d<sup>-1</sup> para a lagoa de aguapés com 19,3 dias de detenção;

- para elevadas cargas superficiais aplicadas de DQO, DBO, NT e PT: 350, 188, 170 e 22 kg/ha/dia, respectivamente, a lagoa de aguapés consegue remoções superiores a 50% de cada parâmetro, com tempo de detenção de 19,3 dias;
- na combinação de lagoas (LA1, LA2, LF e LAG), a introdução da lagoa de aguapés melhorou a eficiência do tratamento em cerca de 2 a 7% para os parâmetros analisados, com exceção do nitrogênio, que está em torno de 13%, mostrando que a remoção deste último é uma das principais funções dessa lagoa;
- a lagoa de aguapés foi monitorada em duas épocas climáticas diferentes: primavera/verão ( $TM = 24,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e outono/inverno ( $TM = 17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), sendo que a mesma apresentou melhor desempenho na época mais fria, evidenciando que o funcionamento dessa lagoa não estava otimizado na época mais quente. Uma das causas se deve ao manejo correto das plantas, já que na época fria a retirada dos aguapés dessa lagoa foi mais freqüente (uma vez por mês), enquanto que na época quente ela ocorreu a cada dois ou três meses. Outra causa é que os aguapés foram os principais removedores da poluição nas condições de inverno “trabalhando” mais que no verão.

Em um sistema de tratamento de dejetos suínos, a obtenção do comportamento dos principais parâmetros (DBO e NT) de funcionamento das lagoas, para ajuste de equações na modelagem e na otimização das mesmas, é de importância fundamental, por evitar a construção de grandes lagoas de formas inadequadas, onerando o processo com a utilização de extensas áreas de terras e com pouca eficiência de matéria orgânica e de nutrientes não compatível com a desejada.

Os modelos atendem eficientemente aos objetivos propostos quanto à minimização de custos do sistema de lagoas de estabilização e quanto à análise econômica do uso da área de terra ocupada pelas lagoas, de sua construção e manutenção.

Os modelos propostos, tanto para um parâmetro quanto para dois parâmetros são dinâmicos, pois permitem a introdução de várias lagoas nos mesmos, selecionando-as conforme as suas

modelagens e os aspectos econômicos. Além disso, permitem que os suinocultores regulem as quantidades de DBO e de Nitrogênio que serão introduzidas nos corpos receptores, os efluentes tratados, levando-se em consideração o capital disponível.

Considerando-se os custos da terra, de escavação mecânica, de revestimento e de manutenção do sistema de lagoas, e admitindo-se taxa de juros de 15% ao ano durante 10 anos, chega-se a resultados interessantes:

a) o custo do sistema de duas lagoas anaeróbias (LA1, LA2), uma facultativa (LF) e uma de aguapés (LAG) é de:

- R\$ 24.695,65 para uma eficiência de 98% de DBO e vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;
- R\$ 36.927,45 para uma eficiência de 98% de DBO e vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia;
- R\$ 30.846,91 para uma eficiência de 99% de DBO e vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;

b) para cinco lagoas LA1, LA2, LF1, LF2 e LAG (supondo que o funcionamento da lagoa LF1 = LF2), o custo é de:

- R\$ 24.406,45 para uma eficiência de 98% de DBO e vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;
- R\$ 36.460,80 para uma eficiência de 98% de DBO e vazão de 50 m<sup>3</sup>/dia;
- R\$ 29.994,47 para uma eficiência de 99% de DBO e vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;

c) para seis lagoas LA1, LA2, LF1, LF2, LF3 e LAG (supondo que o funcionamento da lagoa LF1 = LF2 = LF3), o custo é de R\$ 24.350,34 para uma eficiência de 98% de DBO e vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia.

*Considerando-se a remoção dos parâmetros (DBO e Nitrogênio) nas lagoas e com os fatores  $F_1 = 0,7$  e  $F_2 = 0,8$ :*

d) para quatro lagoas (LA1, LA2, LF e LAG), o custo é de R\$ 33.414,10 para uma eficiência de 98,9 de DBO e de 96,4% de NT, com vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;

e) para cinco lagoas (LA1, LA2, LF1, LF2 e LAG), o custo é de R\$ 29.430,84 para uma eficiência de 98,5 de DBO e de 97,3% de NT, com vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia;

f) para seis lagoas (LA1, LA2, LF1, LF2, LF3 e LAG), o custo é de R\$ 27.683,79 para uma eficiência de 98,2 de DBO e de 97,7% de NT, com vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia.

Para uma mesma eficiência (DBO e NT) e mesmo fator de calibração, o modelo mostra que um aumento no número de lagoas reduz o custo total do sistema.

Tomando-se o valor do item (c)  $CT = R\$ 24.350,34$  e  $Q = 30 \text{ m}^3/\text{dia}$  (admitindo-se 1 suíno = 10 litros/dia), o custo unitário do sistema de lagoas para tratar dejetos de 3.000 suínos é da ordem de R\$ 1,62 por suíno/ano, para uma eficiência de remoção de 98% de DBO<sub>5</sub>. À medida que o número de suínos aumenta, o custo unitário decresce em função da economia de escala, pois para tratar dejetos de 5.000 suínos nas mesmas condições, o custo unitário é de R\$ 1,47 por suíno/ano.

Na remoção dos parâmetros: DBO e Nitrogênio, o valor aumenta, tomando o item (f) contendo seis lagoas, o  $CT = R\$ 27.683,79$  e  $Q = 30 \text{ m}^3/\text{dia}$ , o custo unitário do sistema de lagoas é de R\$ 1,84 por suíno/ano, para uma eficiência de remoção de 98,2 de DBO e de 97,7% de Nitrogênio.

**Recomendações:**

Para o desenvolvimento de futuros trabalhos relacionados à modelagem e otimização de lagoas de estabilização para tratamento de dejetos suínos, recomenda-se:

- a construção de sistemas de lagoas em série e em paralelo, em escala piloto, com fluxo contínuo. No sistema em série, usar tempo de detenção igual para as lagoas, e no sistema de lagoas em paralelo, tempo de detenção diferenciado, visando a eficiência de remoção da matéria orgânica, de nutrientes e dos patogênicos com a variação do tempo de detenção, assim como a determinação de coeficientes cinéticos das mesmas;
- estudos com lagoas facultativas com chicanas, visando aumento de eficiência de remoção da matéria orgânica, de nutrientes e dos patógenos;
- estudos com lagoas aeradas artificialmente;
- estudos de custos no manejo correto dos aguapés e sua utilização na complementação da dieta animal.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGUNWAMBA, J. C. et al. Prediction of the dispersion number in waste stabilization ponds. **Wat. Res.**, v. 26, n. 1, p. 85-89, 1992.

ANDREADAKIS, A. D. Anaerobic digestion of piggery wastes. **Wat. Sci. Tech.**, v. 25, n. 1, p. 9-16, 1992.

APHA - AWWA - WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. Washington, D. C.: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 1992.

ARTHUR, J. P. Notes on the design and operation of waste stabilization ponds in warm climates of developing countries. Technical Paper, n. 7, Washington, DC, 1983.

ASAE D384.1 Manure Production and Characteristics. AGRICULTURAL SANITATION AND WASTE MANAGEMENT COMMITTEE. 1993.

ASAE EP403.1 Design of anaerobic lagoons for animal waste management. AGRICULTURAL SANITATION AND WASTE MANAGEMENT COMMITTEE. 1990.

AZEVEDO NETO, J. M. Aspectos construtivos de lagoas de estabilização. **Rev. DAE**, v. 45, n. 140, p. 44-49, 1985.

AZIZ, M. A., NG, W. J. Feasibility of wastewater treatment using the activated algae process. **Bioresource Technology**, v. 40, n. 3, p. 205-208, 1992.

AZOV, Y., TREGUBOVA, T. Nitrification processes in stabilization reservoirs. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 313-319, 1995.

- BARBARI, M., ROSSI, P. Risparmiare acqua conviene: meno liquami da Smaltire. **Suplemento a l'Informatore Agrario**, Verona, n. 18, p. 11-17, 1992.
- BARKER, J. C. Lagoon design and management for livestock waste treatment and storage. **Water Quality & Waste Management**, North Carolina. Available World Wide Web: <URL: <http://w.w.w.bae.ncsu.edu/...cat/wqwm/ebae103-83.html>>1996.
- BAVARESCO, A. S. L., COSTA, R. H. R, PEDOMO, C. C. Lagoas de aguapés em sistemas de tratamento de dejetos suínos. In: XXV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL: Tratamiento de Aguas Residuales, (1996: México, D.F). México: AIDIS, 1996. p. 41-47.
- BELLI FILHO, P., BORGES DE CASTILHOS, Jr. A. Dejetos de suínos: aspectos qualitativos, quantitativos e tecnológicas para o controle da poluição ambiental In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. ABES. (1991: Goiânia). Goiânia, 1991.
- BELLI FILHO, P. et al. Etude comparative du stockage du lisier de porc avec fosse à chambre unique et avec fosse à chambres en séries. 2ème. COLLOQUE INTERNATIONAL DE RECHERCHE SUR LES SOUS-PRODUITS DE TRAITEMENT ET DÉPURATION DES FLUIDES. Nuisances Agricoles: Constats et Solutions. (1997: Rennes, França). Rennes: Gruttee, 1997.
- BLOUIN, M. et al. Aerobic biodegradation of organic matter of swine waste. **Biological Wastes**, v. 25, n. 2, p. 127-139, 1988.
- BORTONE, G. et al. Nitrification, denitrification and biological phosphate removal in sequencing batch reactors treating piggery wastewater. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 5-6, p. 976-985, 1992.

- BRADLEY, R.M. et al. BOD removal efficiencies in two stabilization lagoons in series in Malaysia. **Wat. Pollut. Control**, v. 82, n. 1, p. 114-122, 1983.
- BRUMM, M. C.; SUTTON, A. L. Composition and anaerobic decomposition. **J. of Animal Science**, v. 49, n. 1, p. 20-25, 1979.
- CETESB - **Operação e manutenção de lagoas de estabilização**. São Paulo, 1990, 90p.
- CHARLES, M. et al. Remoción de compuestos nitrogenados em un sistema de lagunas piloto de estabilización. In: 3<sup>rd</sup>. IAWQ INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology an Aplications. (1995: João Pessoa). João Pessoa: IAWQ, 1995.
- CHIN, K K., ONG, S. L. A Wastewater treatment system for an industrialized pig farm. **Wat. Sci. Tech.**, v. 28, n.7, p.217-222, 1993.
- CIAFARDINI, G. BARBIERI, C. An ecological study of pig slurry purification by the lagoon system: physical an chemical aspects. **Agrochimica**, v. 26, n. 2-3, p. 233-245, 1982.
- CLARK, C. S. et al. Disease risks of ocupational exposure to sewage. **J. of the Envir. Eng. Div.**, v. 102, n. EE2, p. 375-388, 1976.
- CLARK, R. M. Applying economic principles to small water systems. **J. American Water Works Association**, v. 79, n. 5, P. 57-61, 1987.
- COLOMER, F. L., RICO, D. P. Mechanistic model for facultative stabilization ponds. **Wat. Envir. Res.**, v. 65, n. 5, P. 679-685, 1993.
- CONRAD, J. H., MAYROSE, V. B. Animal waste handling and disposal in confinement production of swine. **J. Anim. Sci.**, Champaign, v. 32, n. 4, p. 811-815, 1971.

- COSTA, R. H. R., SILVA, F. C. M, OLIVEIRA, P. A. V. Preliminary studies on the use of lagoons in the treatment of hog waste products. In: 3<sup>rd</sup>. IAWQ INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995a: João Pessoa). João Pessoa: IAWQ, 1995a.
- COSTA, R. H. R., OLIVEIRA, P. A. V, SILVA Estudo de tratamentos preliminares para dejetos de suínos. In: 18<sup>o</sup> CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. ABES 1996b: Salvador, BA.
- COSTA, R. H. R., PERDOMO, C. C., SILVA, F. C. M. Utilization of a baffle settling tank for hog waste treatment. In: 2nd. SPECIALIZED CONFERENCE ON PRETREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATERS.(1996: Athens). Athens: IAWQ, 1996. p. 514-521.
- COSTA, R. H. R. Lagoas de alta taxa de degradação e de aguapés no tratamento terciário de dejetos suínos. Florianópolis, 1997. Trabalho apresentado como parte dos requisitos de concurso público para Professor Titular. Universidade Federal de Santa Catarina.
- COSTA, R. H. R., BAVARESCO, A. S. L., MEDRI, W. Lagoas de aguapés para dejetos suínos. In: SIDISA - SIMPOSIO INTERNAZIONALE DE INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE. (1997a Ravello, Italia). Ravello: ANDIS/ABES, 1997a, p. 988-994.
- COSTA, R. H. R., MEDRI; W., PERDOMO, C. C. Otimização do sistema de tratamento: decantador de palhetas e lagoas anaeróbias, facultativa e de aguapés de dejetos suínos. In: SIDISA SIMPOSIO INTERNAZIONALE DE INGEGNERIA SANITARIA AMBIENTALE. (1997b Ravello, Italia). Ravello: ANDIS/ABES, 1997b, p. 1018-1025.
- CRONHOLM, L. S. Potential health hazards from microbial aerosols in densely populated urban regions. *Appl. and Envir. Microbiol.* v. 39, n. 1, p. 6-12, 1980.

- CURTIS, T. P. et al. Influence of pH, oxygen, and humic substances on ability of sunlight to damage fecal coliforms in waste stabilization pond water. **Appl. and Envir. Microbiol.** v. 58, n. 4, p. 1335-1343, 1992a.
- CURTIS, T. P. et al. The effect of sunlight on faecal coliforms in ponds: implications for research and design. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 7-8, p. 1729-1738, 1992b.
- CURTIS, T. P. et al. Light penetration in waste stabilization ponds. **Wat. Res.**, v. 28, n. 5, p. 1031-1038, 1994.
- DOREGO, N. C., LEDUC, R. Characterization of hydraulic flow patterns in facultative aerated lagoons. **Wat. Sci. Tech.**, v. 34, n. 11, p. 99-106, 1996.
- ELLIS, K. V. TANG, S. L. Wastewater treatment optimization model for developing world. I: model development. **J. of the Envir. Eng.**, v. 117, n. 4, p. 501-518, 1991.
- EMBRAPA. **Aspectos práticos do manejo de dejetos suínos.** 1995. Editado pela Gerência de Editoração e Documentação - EPAGRI.
- EVANS, M. R. et al. Characteristics of slurry from fattening pigs, and comparison with slurry from laying hens. **Agriculture and Environment**, v. 4, n. 1, p. 77-83, 1978.
- EVANS, M. R. et al. Factors in the design of aerobic treatment for animal wastes. In: **PROC. INTERNAT. SYMP. ON LIVESTOCK WASTES.** Michigan, p. 339-345, 1980.
- FERRARA, R. A. et al. Dynamic nutrient cycle model for waste stabilization ponds. **J. of the Envir. Eng. Div.**, v. 106, n. EE1, p. 37-54, 1980.
- FERRARA, A. F., AVCI, C. B. Nitrogen dynamics in waste stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Control Fed.**, v. 54, n. 4, p. 361-369, 1982.

- FINNEY, B. A., MIDDLEBROOKS, E. J. Facultative waste stabilization pond design. **J. Wat. Pollut. Control Fed**, v. 52, n. 1, p.134-147, 1980.
- GERMIRLI, F. et al. Fate of residuals nitrification -denitrification treatment of piggery wastewaters. **Bioresource Technology**, v. 45, n. 3, p. 205-211, 1993.
- GINNIVAN, M. J. Shallow aeration of piggery waste treatment laggons - I: removal of organic pollutants and indicator bacteria. **Agric. Ecosystems Environ.**, v. 10, n. 1, p. 23-29, 1983.
- GLOYNA, E. F. Facultative waste stabilization ponds. In ponds as a wastewater treatment alternative. **Water Resource**, symp. n. 9, p. 143-158, 1976. Center Res. Water Resour. Univ. Texas, Austin.
- GOSMANN, H. A. **Estudos comparativos com esterqueiras e bioesterqueiras para armazenamento e valorização dos dejetos de suínos**. Florianópolis, 1997. Dissertação de de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.
- HERMANSON, R. E. Livestock manure lagoons protect water. **Collection: Water Quality-Waste management**. Available World Wide Web: <URL:[http://www.nalusda.gov/answers/in...\\_AGONS\\_PROTECT\\_WATER-QUALITY.html](http://www.nalusda.gov/answers/in..._AGONS_PROTECT_WATER-QUALITY.html)>.1993
- HESS, M. L. Aspectos praticos de construccion de lagunas de estabilizacion. In. **PROYECTO DE DESARROLLO TECNOLOGICO DE LAS INSTITUCIONES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO**. (1980: Lima, Peru). Lima: CEPIS, 1980. p.1-10.
- HILL, D. T. Modelling techniques and computer simulation of agricultural waste treatment processes. **Agric. Wastes**, v. 2, p. 135-156, 1980.

- JAMES, A. An alternative approach to the design of waste stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p. 213-218, 1987.
- JELINEK, T. Collection, storage and transport of swine wastes. In. Taiganides, E. p. **Animal Wastes**. Essex, England Applied Science, 1977. p.165-174
- JURKOVIC, J. et al. Anaerobic pretreatment plant for pig slurry from the Farma Ihan, Slovenia In: 2nd. SPECIALIZED CONFERENCE ON PRETREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATERS.(1996: Athens). Athens: IAWQ, 1996. p. 507-513
- KAWAI, H. et al. Estabelecimento de critérios para dimensionamento de lagoa de estabilização. **Rev. DAE**, n. 127, p. 37-45, 1981.
- KAWAI, H; GRIECO, V. M. Utilização do aguapé para tratamentos de esgoto doméstico, estabelecimento de critérios de dimensionamento de lagoa de aguapé e abordagem de alguns problemas operacionais. **Rev. DAE**, n. 135, p. 79-90, 1983.
- KEZHAO, Z. Pond system optimization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE. (Singapore: 1994). Anais... Singapore: Singapore Rai, 1994, p. 275-286.
- KHAN, M. A.; AHMAD, S. I. Performance evaluation of pilot waste stabilization ponds in sub-tropical region. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 7-8, p. 1717-1728, 1992.
- KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejos em forma líquida**. Belo Horizonte, 1980. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- LI, X. W. Technical economic analysis of tabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 103-110, 1995.
- LIMA, A. F. Avaliação da eficiência das lagoas facultativas fotossintéticas. **Engenharia Sanitária**, v. 23, n. 1, p. 62-64, 1984.

LIVESTOCK INDUSTRY FACILITIES & ENVIRONMENT. **Design and management of anaerobic lagoons in Iowa for animal manure storage and treatment.** Ames: Iowa State University, 1995. 10p.

LOEHR, R. C. **Agricultural waste management: problems, processes and approaches.** New York: Academic Press, 1974, 576p.

MAMEDE, R. A. **Consumo de água e relação água/ração para suínos em crescimento e terminação.** Belo Horizonte, 1980. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.

MARA, D. D. **Design manual for sewage lagoons in the tropics.** East African Literature Bureau, Nairobi. 1975.

MARA, D. D., PEARSON, H. Artificial freshwater environmental: Waste stabilization ponds. In **Biotechnology**, v. 8, p. 177-206, 1986.

MARAIS, G.v.R. Faecal bacterial kinetics in stabilization ponds. **J. of the Environ. Eng. Div.**, v. 100, n. EE1, p. 119-139, 1974.

MARAIS, G.v.R., SHAW, V. A. A rational theory for the design of sewage stabilization ponds in Central South Africa. **Trans. of South African Inst. of Civil Engrs.**, v. 3, n. 11, p. 205-216, 1961.

MARQUES, J. J., d'AVILA, J. S. An algorithm optimization to project and simulate aerobic and facultative stabilization ponds. In: 3<sup>rd</sup>. IAWQ INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995: João Pessoa, Pb) João Pessoa: IAWQ, 1995.

MARTINEZ, J., HAO, X. A field treatment plant for pig slurry. **Wat Sci. Tech.**, v. 34, n. 11, p. 87-92, 1996.

- MATHEUS, E. M. et al. Correlações entre clorofila, STV e DQO. *Rev. DAE.*, v. 49, n. 154, p. 20-23, 1989.
- MAYO, A. W. Removal in facultative ponds: experience in Tanzania. *Wat. Sci. Tech.*, v. 34, n. 11, p. 107-117, 1996.
- MCGARRY, M. G., PESCOD, M. B. Stabilization pond design criteria for tropical Asia. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR WASTE TREATMENT LAGOONS, 2, 1970, Kansas.
- MEDRI, W., COSTA, R. H. R., PERDOMO, C. C. Avaliação preliminar de sistema de tratamento: decantador de palhetas e lagoa anaeróbia para dejetos suínos. In: 3º SIBESA-SIMPÓSIO ITALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. (1996a: Gramado, RS). Anais eletrônicos ... Gramado: ABES, 1996a.
- MEDRI, W., COSTA, R. H. R., PERDOMO, C. C. Estudo econômico e avaliação preliminar de sistema de tratamento: lagoas anaeróbia e facultativa para dejetos suínos. In: XXV CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL: Tratamiento de Aguas Residuales, (1996b: México, D. F). México: AIDIS, 1996b. p.388-395.
- MEISHENG, N., XU, S. Technical and economic analysis of stabilization ponds. *Wat. Sci. Tech.*, v. 24, n. 5, p. 55-62, 1991.
- MEISHENG, N. et al. System optimization of stabilization ponds. *Wat. Sci. Tech.*, v. 26, n. 7- 8, p. 1679-1688, 1992.
- MENDONÇA, S. R. **Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente: Novos conceitos.** Parafba: Editora Universitária, 1990, 388p.
- MERKEL, J. A. **Managing livestock wastes.** Avic Publishing Company, Inc., 1981, 419p.

- MIDDLEBROOKS, E. J. Design equations for BOD removal in facultative ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p. 187-193, 1987.
- MILLS, S. W. et al. Efficiency of faecal bacterial removal in waste stabilization ponds in Kenya. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 7-8, p. 1739-1748, 1992.
- MOELLER, J. R., CALKINS, J. Bactericidal agents in wastewater lagoons and lagoon design. **J. Wat. Pollut. Control Fed.**, v. 52, n. 10, p. 2442-2451, 1980.
- MERCADO AGRÍCOLA. Florianópolis, Instituto CEPA/SC. 1997, jul.
- MORENO, M. D. et al. Modeling the performance of deep waste stabilization ponds. **Wat. Res. Bull.**, v. 24, n. 2, p. 377-386, 1988.
- MUTTAMARA, S., PUETPAIBOON. Nitrogen removals in baffled waste stabilization ponds. In: 3rd. IAWQ. INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995: João Pessoa, Pb). João Pessoa: IAWQ, 1995.
- NOÛE, J. et al. Biotreatment of swine manure by intensive lagooning during winter. **Bioresource Technology**, v. 50, n.3, p. 213-219, 1994.
- OLESZKIEWICZ, J. A. Anaerobic and aerobic biofiltration of agricultural effluents. **Agric. Wastes**, v. 3, n. 4, p. 285-296, 1981.
- OLESZKIEWICZ, J. A. Aerated lagoon treatment of piggery waste: kinetics of carbon removal. **Agric. Wastes**, v. 16, n. 2, p. 121-134, 1986.
- OLESZKIEWICZ, J.A., KOZIARSKI, S. Management and treatment of wastes from large piggers. **Agric. Wastes**, v. 3, n. 2, p. 123-144, 1981.

- OLESZKIEWICZ, J. A., KOZIARSKI, S. Kinetics of piggery wastes treatment in anaerobic lagoons. *Agric. Wastes*, v. 16, n. 1, p. 13-25, 1986.
- OLIVEIRA, P. A.V., Colaboradores. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. Concórdia. EMBRAPA/CNPSA, 1993, 188p.
- OLIVEIRA, P.V.A. et al. Lagoons for treatment of waste products from hogs: hogs: example of Coopercentral, In: 3<sup>rd</sup> IAWQ. INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995: João Pessoa, Pb). João Pessoa: IAWQ, 1995.
- OLIVEIRA, R. **The performance of deep waste stabilization ponds in northeast Brazil**. Inglaterra, 1990. Tese de doutorado. Universidade de Leeds.
- OLIVEIRA, R. et al. The performance of a pilot-scale series of ten ponds treating municipal sewage in northeast Brazil, In: 3<sup>rd</sup>. IAWQ INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP: Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995: João Pessoa, Pb). João Pessoa: AWQ, 1995x.
- ORAGUI, J. I. et al. The removal of excreta bacteria and viruses in deep stabilization ponds in northeast Brazil. *Wat. Sci. Tech.*, v. 19, n. 3-4, p. 569-573, 1987.
- ORAGUI, J. I. et al. Pathogen removal kinetics in a tropical experimental waste stabilization ponds in relation to organic loading, retention time and pond geometry. In: 3<sup>rd</sup>. IAWQ. INTERNATIONAL SPECIALIST CONFERENCE AND WORKSHOP. Waste Stabilization ponds: Technology and Applications. (1995: João Pessoa, Pb). João Pessoa: AWQ, 1995
- ORHON, D. et al. Biological treatability of dairy wastewaters. *Wat. Res.*, v. 27, n. 4, p. 625-633, 1993.

- ORON, G, SHELEF, G. Maximizing algal yield in high-rate oxidation ponds. **J. of the Envir. Div.**, v. 108, n. EE4, p. 730-737, 1982.
- OVERCASH, M. R. et al. **Livestock waste management**. Boca Raton: CRC, 1983, v. 1, 255p.
- PANO, A., MIDDLEBROOKS, E. J. Ammonia nitrogen removal in facultative wastewater stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Control Fed.**, v. 54, n. 4, p. 344-351, 1982.
- PEARSON, H. W. et al. Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p. 145-152, 1987.
- PEARSON, H. et al. The influence of pond geometry and configuration on facultative and maturation waste stabilization pond performance and efficiency. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 129-139, 1995.
- PICOT, B. et al. Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate. **Wat. Sci. Tech.**, v. 23, n. 7, p. 1535-1541, 1991.
- PICOT, B. et al. Using diurnal variations in a high rate algal pond for management pattern. **Wat. Sci. Tech.**, v. 28, n. 10, p. 169-175, 1993.
- POLPRASERT, C., BHATTARAI, K.K. Dispersion model for waste stabilization ponds. **J. Envir. Eng.**, v. 111, n. 1, p. 45-59, 1985.
- POLPRASERT, C. et al. Bacterial die-off kinetics in waste stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Control Fed.**, v. 55, n. 3, p. 285-296, 1983.
- POLPRASERT, C. et al. Pig wastewater treatment in water hyacinth ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 9 - 11, p. 2381-2384, 1992.

PUSKAS, et al. Performance of an integrated ponding system operated in arid zones. **Wat. Sci. Tech.**, v. 23, n. 7-9, p. 1543-1552, 1991.

REED, S. C. Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Control Fed.**, v. 575, n. 1, p. 39-45, 1985.

ROBINSON, K. et al. Microbiological aspects of aerobically treated swine waste. In: PROC. INTERNAT. SYMP. ON LIVESTOCK WASTES. American Society of Agricultural Engineers, Michingan, P. 225-228, 1971.

ROPPA, L. Suíno: mitos e verdades. *Suinocultura Industrial*, n. 127, abr/jun., 1997.

SAFLEY, L. M. Building an managing swine lagoons. **American Association of Swine Practitioners**, 1996.

SAFLEY, L. M. et al. Lagoon management. **Pork Industry Handbook**, West Lafayette. Available World Wide Web: <URL: <http://hermes.ecn.purdue.edu.8001/cgi/convert?PIH-62>>. 1997

SANCHEZ, E. P. et al. Effect of the organic volumetric loading rate on soluble COD removal in down-flow anaerobic fixed-bed reactores. **Biores. Technol.**, v. 47, n. 2, p. 173-176, 1994

SANTA CATARINA. Legislação Ambiental Estadual, Decreto nº 14.250, de 05 de junho de 1981.

SANTOS, M. C. R., OLIVEIRA, J. F. S. Nitrogen transformations and removal in waste stabilization ponds in Portugal. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p. 123-130, 1987.

SAQQAR, M. M. Coliform die-off in waste stabilization ponds in Jordan. PROC. REGIONAL SEMINAR ON WASTEWATER RECLAMATION AND REUSE CAIRO EGGIPT, 1988 Rome: In. Food and Agriculture Organization.

- SAQQAR, M. M.; PESCOD, M. B. Modelling coliform reduction in wastewater stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 26, n. 7-8, p.1667-1677, 1992.
- SAQQAR, M. M., PESCOD, M. B. Modelling the performance of anaerobic wastewater stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 171-183, 1995.
- SARIKAYA, H. Z. et al. Basis of treatment cost sharing in organized industrial estates: case study. In: 2nd. SPECIALIZED CONFERENCE ON PRETREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATERS.(1996: Athens). Athens: IAWQ, 1996. p.723-727.
- SILVA, P. R. **Lagoas de estabilização para tratamento de resíduos de suínos**. São Carlos, 1973. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- SILVA, S. A. **Trabalho de esgotos domésticos em lagoas de estabilização no nordeste do Brasil**. Paraíba, 1982. Universidade Federal da Paraíba, agosto 1982, 249p.
- SILVA, S. A., MARA, D. D. **Tratamentos biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização**. ABES. Rio de Janeiro. 1979, 139p.
- SILVA, S. A. et al. Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 321-330, 1995.
- SÍNTESE ANUAL DA AGRICULTURA DE SANTA CATARINA. Florianópolis, Instituto CEPA/SC., 1995.
- SOMIYA, I., FUJII, S. Material balances of organics and nutrients in an oxidation pond. **Water Research**, v. 18, n. 3, p. 325-333, 1984.
- SOUSA, J. M. G. Wastewater stabilization lagoon design criteria for Portugal. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p. 7-16, 1987.

- SOUSA, A. A. P. **Remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos e indicadores bacteriológicos em lagoas de estabilização em escala real.** Campina Grande, 1994. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba.
- SOUSA, A. de. Como tratar e utilizar os dejetos de suínos. **Suinocultura Industrial**, p. 16-18, maio, 1995.
- SUINOCULTURA INDUSTRIAL. São Paulo: Gessulli, v. 20, n. 126, Jan./Mar., 1997. Anuário.
- SURAMPALLI, R. Y. et al. Phosphorus removal in ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 12, p. 331-339, 1995.
- SWEETEN, J. M. et al. Lagoon systems for swine waste treatment. **Coop. Ext. Serv.** Michigan State University. Pork Ind. Hand. 1979.
- SWINE MANURE MANAGEMENT PLANNING. **Swine Manure Management Planning**, West Lafayette. Available World Wide Web: <URL: <http://hermes.ecn.perdue.edu.8001/cgi/convert?ID-205>>. 1997.
- TAIGANIDES, E. P. Bio-engineering properties of feedlot wastes. In: **ANIMAL WASTES**. Essex, England Applied Science, 1977. p. 131-153.
- TAIGANIDES, E. P. Animal farming effluent problems - an integrated approach: Resource recovery in large scale pig farming. **Wat. Sci. Tech**, v.18, p. 47-55, 1986.
- TEIXEIRA PINTO, M., ONOYAMA, M. T. Remoção de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio de esgotos domésticos utilizando o processo de lagoa de taxa alta. **Rev. DAE**. n. 161, p. 6-8, 1991.

- TELTSCH, B., KATZNELSON, E. Airbone enteric bacteria and viruses from spray irrigation with wastewater. *Appl. Envir. Microbiol.*, v. 35, n. 2, p. 290-296, 1978.
- THIRUMURTHI, D. Design principles for waste stabilization ponds. *J Sanit. Eng. Div. ASCE*, v. 2, n. 95, p.311-330,1969.
- THIRUMURTHI, D. Design criteria for waste stabilization ponds. *J. Wat. Pollut. Control. Fed.*, v. 46, n. 9, p. 2094-2106, 1974.
- TOMS, I. P. et al. Observations on the performance of polishing lagoons. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, v. 74, p. 383-401, 1975.
- UHLMANN, D. et al. A new design procedure for waste stabilization ponds. *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, v. 55, n. 10, p. 1252-1255, 1983.
- VENKATARAMAN, J et al. Determination of kinetic constants for a two -stage anaerobic upflow packed-bed reactor for dairy wastewater. *Bioresource Technology*, v. 40, p. 253-261, 1992.
- VICENT, L.G. et al. A system of sanitation for low-cost high density housing. *PROC. SYMP. ON HIGIENE AND SANITATION IN RELATION TO HOUSING*. Niamey, Londres, Commission for Technical Cooperation, South of Sahara, 1962, p. 135-172, 1963.
- VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização: princípios do tratamento biológico de águas resiguárias**. DESA-UFMG, 1996a, 134p.
- VON SPERLING, M. Detrminação da taxa de decaimento bacteriano em lagoas de estabilização em função das relações geométricas da lagoa. In: 3º SIBESA - SIMPÓSIO ITALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. (1996b: Gramado, RS). Anais eletrônicos ... Gramado: ABES, 1996b.

WEHNER, J. F., WILHELM, R. H. Boundary conditions of flow reactors. **Chemical Engrg. Sci.**, v. 6, n. 1, p. 89-93, 1956.

WORLD AGRICULTURAL PRODUCTION. Washington, D. C.: United States Department of Agriculture, march, 1997. (Circulares WAP 03-975).

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Wastewater stabilization ponds. Principles of planning & practice.** Alexandria, 1987, 139 p.

WOLVERTON, B. C., MACDONALD, R. The water hyacinth: from prolific pest to potential provider. **AMBIO**, v. 8, n. 1, p. 2-9, 1979.

YANEZ, F. **Lagunas de estabilizacion Teoria, disenõ y mantenimiento - ETAPA**, Cuenca, Ecuador, 1993, 421p.

YANG, P. Y. et al. A swine waste package biotreatment plant for the tropics. **Wat Sci. Tech.**, v. 28, n. 2, p. 211-218, 1993.

YANG, P. Y., CHEN, H. A land- limited and energy - saving treatment system for swine wastewater. **Bioresource Tecnology**, v. 49, n.2, p. 129-137, 1994.

YANG, P. Y. et al. A prototippe small swine waste treatment system for land limited and tropical application. **Wat. Sci. Tech.**, v.35, n. 6, p. 145-152, 1997.

## **ANEXOS**

## ANEXO I

Tabela I.1 - Valores médios obtidos para o decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro de 1996.

| AMOSTRAS  | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Amostra 1 | 7,01                | 18.209     | 7.389      | 10.821     | 23.105      | 13.500                   | 2.300      | 646        |
| Amostra 2 | 7,01                | 9.954      | 4.345      | 5.608      | 15.920      | 8.308                    | 1.928      | 393        |

Amostra 1 - afluente do decantador de palhetas (dejeito bruto);

Amostra 2 - efluente do decantador de palhetas.

Tabela I.2 - Valores médios obtidos para a lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro a outubro de 1996

| AMOSTRAS  | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Amostra 2 | 7,01                | 9.954      | 4.345      | 5.608      | 15.920      | 8.308                    | 1.928      | 393        |
| Amostra 3 | 7,41                | 4.974      | 2.615      | 2.359      | 3.316       | 1.500                    | 1.430      | 133        |
| Amostra 4 | 7,44                | 4.942      | 2.645      | 2.297      | 3.190       | 1.507                    | 1.426      | 129        |
| Amostra 5 | 7,48                | 4.957      | 2.646      | 2.312      | 3.177       | 1.333                    | 1.416      | 122        |
| Amostra 6 | 7,48                | 4.941      | 2.602      | 2.339      | 3.209       | 1.856                    | 1.417      | 122        |
| Amostra 7 | 7,50                | 4.863      | 2.621      | 2.242      | 3.182       | 1.400                    | 1.420      | 122        |
| Amostra 8 | 7,56                | 4.686      | 2.506      | 2.180      | 3.167       | 1.653                    | 1.370      | 120        |

Amostra 2 - afluente da lagoa LA1;

Amostra 3 - lagoa LA1, d = 1,2 m do afluente;

Amostra 4 - lagoa LA1, d = 1,9 m do afluente;

Amostra 5 - lagoa LA1, d = 3,2 m do afluente;

Amostra 6 - lagoa LA1, d = 5,0 m do afluente;

Amostra 7 - lagoa LA1, d = 7,5 m do afluente;

Amostra 8 - efluente da lagoa LA1;

Tabela I.3 - Valores médios obtidos para a lagoa LA2 no CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro a outubro de 1996

| AMOSTRAS   | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|            | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Amostra 8  | 7,56                | 4.713      | 2.537      | 2.176      | 3.217       | 1.871                    | 1.395      | 117        |
| Amostra 9  | 7,74                | 3.448      | 2.165      | 1.283      | 1.584       | -                        | 1.108      | 69         |
| Amostra 10 | 7,74                | 3.473      | 2.137      | 1.336      | 1.530       | 465                      | 1.032      | 68         |
| Amostra 11 | 7,75                | 3.443      | 2.149      | 1.297      | 1.539       | -                        | 1.067      | 67         |
| Amostra 12 | 7,78                | 3.512      | 2.157      | 1.354      | 1.532       | 842                      | 1.049      | 67         |
| Amostra 13 | 7,79                | 3.486      | 2.136      | 1.350      | 1.524       | -                        | 1.064      | 68         |
| Amostra 14 | 7,82                | 3.528      | 2.127      | 1.401      | 1.522       | 714                      | 998        | 64         |

Amostra 8 - afluente da lagoa LA2;

Amostra 9 - lagoa LA2, d = 1,2 m do afluente;

Amostra 10 - lagoa LA2, d = 1,9 m do afluente;

Amostra 11 - lagoa LA2, d = 3,2 m do afluente;

Amostra 12 - lagoa LA2, d = 5,0 m do afluente;

Amostra 13 - lagoa LA2, d = 7,5 m do afluente;

Amostra 14 - efluente da lagoa LA2.

Tabela I.4 - Valores médios obtidos para a lagoa LF no CNPSA/EMBRAPA, no período de março a outubro de 1996

| AMOSTRAS   | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|            | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Amostra 14 | 7,81                | 3.658      | 2.205      | 1.453      | 1.580       | 761                      | 1.049      | 66         |
| Amostra 15 | 7,86                | 1.924      | 1.163      | 761        | 841         | -                        | 387        | 43         |
| Amostra 16 | 7,87                | 1.924      | 1.193      | 730        | 779         | -                        | 375        | 42         |
| Amostra 17 | 7,91                | 2.023      | 1.249      | 775        | 791         | 459                      | 397        | 40         |
| Amostra 18 | 7,92                | 2.030      | 1.220      | 810        | 760         | -                        | 388        | 40         |
| Amostra 19 | 8,01                | 2.304      | 1.450      | 854        | 830         | 425                      | 541        | 43         |

Amostra 14 - afluente da lagoa LF;

Amostra 15 - lagoa LF, d = 1,5 m do afluente;

Amostra 16 - lagoa LF, d = 4,0 m do afluente;

Amostra 17 - lagoa LF, d = 7,2 m do afluente;

Amostra 18 - lagoa LF, d = 11,1 m do afluente;

Amostra 19 - efluente da lagoa LF.

Tabela I.5- Valores médios obtidos para a lagoa LAG no CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro de 1996 a fevereiro de 1997

| AMOSTRAS   | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|            | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Amostra 19 | 7,84                | 2.244      | 1.345      | 899        | 821         | 428                      | 362        | 48         |
| Amostra 20 | 7,78                | 1.344      | 734        | 609        | 417         | 229                      | 198        | 28         |
| Amostra 21 | 7,81                | 1.265      | 704        | 561        | 378         | 206                      | 177        | 26         |
| Amostra 22 | 7,75                | 1.279      | 731        | 548        | 366         | 187                      | 163        | 25         |
| Amostra 23 | 7,77                | 1.442      | 769        | 673        | 395         | 216                      | 184        | 25         |

Amostra 19 - afluente da lagoa LAG;

Amostra 20 - lagoa LAG, d = 6,25 m do afluente;

Amostra 21 - lagoa LAG, d = 12,50 m do afluente;

Amostra 22 - lagoa LAG, d = 18,75 m do afluente;

Amostra 23 - efluente da lagoa LAG.

## ANEXO II

Tabela II.1 - Valores médios obtidos para o decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| AMOSTRAS          | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Afluente          | 6,9                 | 17.240     | 6.974      | 10.266     | 21.647      | 11.979                   | 2.205      | 633        |
| Efluente médio    | 7,0                 | 9.950      | 4.056      | 5.894      | 15.153      | 8.304                    | 1.825      | 391        |
| Efic. remoção (%) | -                   | 42         | 42         | 43         | 30          | 31                       | 17         | 38         |

Tabela II.2 - Valores médios obtidos para a lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| AMOSTRAS          | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Afluente          | 7,0                 | 9.950      | 4.056      | 5.894      | 15.153      | 8.304                    | 1.825      | 391        |
| Efluente médio    | 7,4                 | 4.773      | 2.543      | 2.230      | 3.308       | 1.833                    | 1.409      | 140        |
| Efic. remoção (%) | -                   | 52         | 37         | 62         | 78          | 78                       | 23         | 64         |

Tabela II.3 - Valores médios obtidos para a lagoa LA2 no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de fevereiro de 1996 a agosto de 1997

| AMOSTRAS          | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Afluente          | 7,4                 | 4.660      | 2.503      | 2.156      | 3.281       | 2.137                    | 1.424      | 141        |
| Efluente médio    | 7,7                 | 3.266      | 1.962      | 1.305      | 1.439       | 778                      | 970        | 67         |
| Efic. Remoção (%) | -                   | 30         | 22         | 39         | 56          | 64                       | 32         | 52         |

Tabela II.4 - Valores médios obtidos para a lagoa LF no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de março de 1996 a agosto de 1997

| AMOSTRAS          | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Afluente          | 7,7                 | 3.391      | 2.013      | 1.378      | 1.498       | 831                      | 1.005      | 69         |
| Efluente médio    | 7,8                 | 2.254      | 1.360      | 894        | 807         | 435                      | 413        | 48         |
| Efic. Remoção (%) | -                   | 34         | 32         | 35         | 46          | 48                       | 59         | 30         |

Tabela II.5 - Valores médios obtidos para a lagoa LAG no CNPSA/EMBRAPA, no período de monitoramento de outubro de 1996 a agosto de 1997

| AMOSTRAS          | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |                          |            |            |
|-------------------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|--------------------------|------------|------------|
|                   | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO <sub>5</sub><br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Afluente          | 7,8                 | 2.512      | 1.498      | 1.014      | 844         | 454                      | 420        | 56         |
| Efluente médio    | 7,7                 | 1.320      | 779        | 541        | 355         | 213                      | 173        | 26         |
| Efic. Remoção (%) | -                   | 47         | 48         | 47         | 58          | 53                       | 59         | 54         |

## ANEXO III

Tabela III. 1 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente do decantador DP no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| MESES     | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |             |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO<br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l |
| Janeiro   | 6,3                 | 48.300     | 9.047      | 39.252     | 49.762      | 19.000      | 3.194      | 811        |
|           | 6,5                 | 8.251      | 3.533      | 4.718      | 24.255      | 9.625       | 1.594      | 371        |
| Fevereiro | 7,0                 | 27.276     | 17.883     | 9.342      | 31.856      | 12.000      | 2.774      | 1.001      |
|           | 6,9                 | 14.167     | 8.747      | 5.420      | 21.844      | 10.150      | 2.467      | 536        |
| Março     | 6,9                 | 17.674     | 6.349      | 11.326     | 22.025      | 11.000      | 2.667      | 882        |
|           | 7,2                 | 12.539     | 4.427      | 8.112      | 18.025      | 9.333       | 2.218      | 505        |
| Abril     | 7,1                 | 15.596     | 4.430      | 11.166     | 20.067      | -           | 1.947      | 412        |
|           | 7,2                 | 7.640      | 3.499      | 4.141      | 14.587      | 8.375       | 1.856      | 303        |
| Maio      | 7,1                 | 13.562     | 5.095      | 8.467      | 15.108      | -           | 2.254      | 496        |
|           | 7,1                 | 9.429      | 3.676      | 5.753      | 12.491      | 6.300       | 2.035      | 221        |
| Junho     | 7,1                 | 15.638     | 6.398      | 9.241      | 21.625      | -           | 2.380      | 787        |
|           | 7,0                 | 11.990     | 4.543      | 7.448      | 14.233      | 6.000       | 2.445      | 551        |
| Julho     | 7,3                 | 15.953     | 6.139      | 9.814      | 22.207      | -           | 2.102      | 531        |
|           | 7,2                 | 9.246      | 4.108      | 5.138      | 17.600      | -           | 1.597      | 417        |
| Agosto    | 7,1                 | 14.937     | 6.630      | 8.308      | 17.737      | -           | 1.551      | 428        |
|           | 6,9                 | 6.435      | 2.729      | 3.706      | 11.111      | -           | 1.299      | 334        |
| Setembro  | 7,0                 | 15.058     | 5.536      | 9.522      | 20.481      | -           | 2.068      | 638        |
|           | 6,9                 | 10.575     | 3.752      | 6.823      | 14.244      | -           | 1.574      | 359        |
| Outubro   | 6,7                 | 10.249     | 4.011      | 6.238      | 19.524      | 11.000      | 2.218      | 527        |
|           | 6,8                 | 8.132      | 3.271      | 4.861      | 13.975      | 10.250      | 1.911      | 366        |
| Novembro  | 6,7                 | 8.717      | 2.866      | 5.852      | 13.551      | 7.833       | 1.400      | 350        |
|           | 6,8                 | 7.286      | 2.666      | 4.620      | 10.282      | 6.333       | 1.360      | 287        |
| Dezembro  | 6,8                 | 15.308     | 4.819      | 10.489     | 19.162      | 8.333       | 1.795      | 645        |
|           | 7,0                 | 13.195     | 3.122      | 10.072     | 13.284      | 8.133       | 1.289      | 321        |
| Janeiro   | 7,3                 | 12.517     | 3.781      | 8.736      | 20.025      | 8.437       | 1.732      | 554        |
|           | 7,3                 | 9.858      | 3.493      | 6.365      | 14.450      | 7.250       | 1.570      | 418        |
| Fevereiro | 7,1                 | 15.513     | 5.460      | 10.053     | 15.090      | 9.500       | 2.404      | 156        |
|           | 7,2                 | 9.879      | 2.834      | 7.063      | 14.210      | 5.500       | 1.612      | 143        |
| Maio      | 6,8                 | 12.723     | 4.540      | 8.183      | 15.365      | 9.750       | 1.527      | 539        |
|           | 7,2                 | 7.621      | 3.099      | 4.592      | 10.315      | 6.400       | 1.290      | 333        |
| Junho     | 6,4                 | 24.304     | 8.536      | 15.768     | 20.414      | 15.750      | 3.052      | 844        |
|           | 6,6                 | 12.420     | 4.453      | 7.968      | 15.416      | 11.000      | 2.243      | 537        |
| Julho     | 6,5                 | 18.514     | 6.537      | 11.976     | 17.885      | 12.750      | 2.290      | 692        |
|           | 6,8                 | 10.056     | 3.776      | 6.280      | 12.866      | 8.750       | 1.767      | 436        |
| Agosto    | 7,0                 | 23.513     | 16.846     | 6.668      | 29.417      | 19.600      | 3.445      | 870        |
|           | 7,0                 | 8.736      | 5.313      | 3.423      | 19.833      | -           | 2.434      | 468        |

Tabela III. 2 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LA1 no CNPSA/EMBRAPA, no período de janeiro de 1996 a agosto de 1997.

| MESES     | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |             |            |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO<br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l | Temp<br>°C |
| Janeiro   | 6,5                 | 8.251      | 3.533      | 4.718      | 24.255      | 9.625       | 1.594      | 371        | 25,4       |
|           | 7,4                 | 4.186      | 2.290      | 1.896      | 2.406       | 962         | 1.098      | 110        |            |
| Fevereiro | 6,9                 | 14.168     | 8.747      | 5.420      | 21.837      | 10.150      | 2.467      | 536        | 25,9       |
|           | 7,7                 | 5.464      | 2.657      | 2.807      | 3.473       | 1.479       | 1.429      | 148        |            |
| Março     | 7,2                 | 12.539     | 4.427      | 8.112      | 18.025      | 9.333       | 2.218      | 505        | 27,2       |
|           | 7,7                 | 4.724      | 2.677      | 2.046      | 2.769       | 1.594       | 1.349      | 102        |            |
| Abril     | 7,2                 | 7.640      | 3.499      | 4.141      | 14.587      | 8.375       | 1.856      | 303        | 24,3       |
|           | 7,7                 | 5.213      | 2.817      | 2.396      | 3.592       | 1.849       | 1.582      | 90         |            |
| Maio      | 7,1                 | 9.429      | 3.676      | 5.753      | 12.491      | 6.300       | 2.035      | 221        | 21,2       |
|           | 7,5                 | 5.292      | 2.734      | 2.558      | 3.293       | 1.813       | 1.451      | 103        |            |
| Junho     | 7,1                 | 11.990     | 4.543      | 7.448      | 14.233      | 6.000       | 2.445      | 551        | 16,3       |
|           | 7,3                 | 5.891      | 3.029      | 2.862      | 4.671       | 2.150       | 1.611      | 161        |            |
| Julho     | 7,2                 | 9.246      | 4.108      | 5.138      | 17.600      | -           | 1.597      | 417        | 10,8       |
|           | 7,5                 | 4.168      | 2.418      | 1.750      | 3.323       | -           | 1.320      | 101        |            |
| Agosto    | 7,1                 | 6.435      | 2.729      | 3.706      | 11.111      | -           | 1.299      | 282        | 16,1       |
|           | 7,3                 | 3.939      | 2.243      | 1.696      | 2.894       | -           | 1.256      | 115        |            |
| Setembro  | 7,0                 | 10.575     | 3.752      | 6.823      | 14.244      | -           | 1.574      | 359        | 20,9       |
|           | 7,2                 | 4.699      | 2.439      | 2.260      | 2.881       | -           | 1.391      | 130        |            |
| Outubro   | 6,9                 | 8.132      | 3.271      | 4.861      | 13.975      | 10.250      | 1.911      | 366        | 22,7       |
|           | 7,3                 | 4.829      | 2.384      | 2.445      | 3.288       | 1.937       | 1.378      | 145        |            |
| Novembro  | 6,8                 | 7.286      | 2.666      | 4.620      | 10.282      | 6.663       | 1.360      | 287        | 24,7       |
|           | 7,0                 | 3.585      | 2.139      | 1.446      | 2.646       | 1.667       | 1.131      | 104        |            |
| Dezembro  | 7,0                 | 13.195     | 3.122      | 10.072     | 13.284      | 8.133       | 1.289      | 320        | 26,6       |
|           | 7,4                 | 3.907      | 2.160      | 1.746      | 3.030       | 1.700       | 1.211      | 89         |            |
| Janeiro   | 7,3                 | 9.858      | 3.493      | 6.365      | 14.450      | 7.250       | 1.570      | 418        | 29,5       |
|           | 7,9                 | 3.985      | 2.199      | 1.785      | 3.107       | 1.800       | 1.111      | 105        |            |
| Fevereiro | 7,2                 | 9.897      | 2.834      | 7.063      | 14.210      | 5.500       | 1.612      | 143        | 27,8       |
|           | 7,9                 | 3.170      | 1.763      | 1.407      | 3.570       | 2.000       | 888        | 46         |            |
| Maio      | 7,2                 | 7.691      | 3.099      | 4.592      | 10.315      | 6.900       | 1.290      | 333        | 19,0       |
|           | 7,4                 | 4.915      | 3.058      | 1.857      | 3.042       | 2.237       | 1.272      | 121        |            |
| Junho     | 6,6                 | 12.420     | 4.453      | 7.967      | 15.416      | 11.000      | 2.243      | 537        | 14,6       |
|           | 7,1                 | 6.209      | 3.452      | 2.757      | 5.721       | 2.212       | 2.371      | 430        |            |
| Julho     | 6,8                 | 10.056     | 3.776      | 6.280      | 12.866      | 8.700       | 1.767      | 436        | 19,5       |
|           | 7,5                 | 7.526      | 3.338      | 4.188      | 5.350       | -           | 1.568      | 445        |            |
| Agosto    | 7,0                 | 8.736      | 5.313      | 3.423      | 19.833      | -           | 2.434      | 468        | 18,4       |
|           | 7,4                 | 4.042      | 1.514      | 2.527      | 3.725       | 2.400       | 1.497      | 111        |            |

Tabela III. 3 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LA2 no CNPSA/EMBRAPA, no período de fevereiro de 1996 a agosto de 1997.

| MESES     | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |             |            |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO<br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l | Temp<br>°C |
| Fevereiro | 7,8                 | 5.031      | 2.743      | 2.288      | 4.383       | -           | 1.561      | 154        | 30,0       |
|           | 7,8                 | 2.166      | 1.271      | 895        | 876         | -           | 563        | 43         |            |
| Março     | 7,7                 | 4.724      | 2677       | 2.047      | 3.019       | 1.594       | 1.349      | 102        | 26,7       |
|           | 8,1                 | 2.528      | 1.728      | 800        | 719         | 416         | 550        | 50         |            |
| Abril     | 7,7                 | 5.213      | 2.817      | 2.396      | 3.592       | 2.098       | 1.582      | 90         | 23,3       |
|           | 7,9                 | 3.248      | 2.141      | 1.107      | 997         | 575         | 1.116      | 46         |            |
| Maio      | 7,5                 | 5.292      | 2.734      | 2.558      | 3.293       | 2.013       | 1.503      | 103        | 20,3       |
|           | 7,8                 | 3.911      | 2.400      | 1.511      | 1.437       | 931         | 1.167      | 67         |            |
| Junho     | 7,3                 | 5.891      | 3.029      | 2.558      | 4.671       | 2.150       | 1.611      | 161        | 15,6       |
|           | 7,7                 | 4.064      | 2.321      | 1.511      | 1.837       | 1.200       | 1.198      | 76         |            |
| Julho     | 7,5                 | 4168       | 2.418      | 1.750      | 3.323       | -           | 1.320      | 106        | 10,6       |
|           | 7,7                 | 3.748      | 2.398      | 1.350      | 2.261       | -           | 1.286      | 62         |            |
| Agosto    | 7,3                 | 3.939      | 2.243      | 1.696      | 2.894       | -           | 1.256      | 115        | 16,0       |
|           | 7,6                 | 3.359      | 2.070      | 1.289      | 1.846       | -           | 1.033      | 78         |            |
| Setembro  | 7,2                 | 4.699      | 2.439      | 2.260      | 2.756       | -           | 1.391      | 130        | 20,4       |
|           | 7,6                 | 3.520      | 2.027      | 1.493      | 1.413       | -           | 1.020      | 78         |            |
| Outubro   | 7,3                 | 4.829      | 2.384      | 2.445      | 3.288       | 1.937       | 1.378      | 145        | 22,6       |
|           | 7,6                 | 3.528      | 1.961      | 1.567      | 1.576       | 425         | 1.127      | 74         |            |
| Novembro  | 7,0                 | 3.585      | 2.139      | 1.446      | 2646        | 1.667       | 1.131      | 104        | 24,4       |
|           | 7,1                 | 2.974      | 1.562      | 1.412      | 1.226       | 900         | 933        | 76         |            |
| Dezembro  | 7,4                 | 3.907      | 2.160      | 1.746      | 2.178       | 1.700       | 1.211      | 89         | 26,1       |
|           | 7,7                 | 3.057      | 2.026      | 1.031      | 1.258       | 737         | 905        | 54         |            |
| Janeiro   | 7,9                 | 3.985      | 2.199      | 1.785      | 3.107       | 2.050       | 1.111      | 105        | 25,4       |
|           | 8,1                 | 3.163      | 1888       | 1.275      | 1.278       | 1.050       | 764        | 63         |            |
| Fevereiro | 7,9                 | 3.170      | 1.763      | 1.407      | 3.570       | 2.000       | 888        | 46         | 26,8       |
|           | 8,1                 | 2.930      | 1.848      | 1.081      | 1.850       | 1.450       | 786        | 29         |            |
| Maio      | 7,4                 | 4.915      | 3.058      | 1.857      | 3.042       | 2.462       | 1.272      | 121        | 19,0       |
|           | 7,6                 | 2.995      | 2.087      | 908        | 1.124       | 775         | 637        | 62         |            |
| Junho     | 7,1                 | 6.209      | 3.452      | 2.757      | 5.721       | 2.587       | 2.371      | 430        | 15,0       |
|           | 7,2                 | 3.439      | 2.259      | 1.180      | 919         | 637         | 875        | 80         |            |
| Julho     | 7,5                 | 7.256      | 3.338      | 4.188      | 5.350       | -           | 1.568      | 445        | 20,5       |
|           | 7,8                 | 3.390      | 1.941      | 1.449      | 1.160       | -           | 914        | 87         |            |
| Agosto    | 7,4                 | 4.042      | 1.514      | 2.527      | 3.725       | 2.400       | 1.497      | 111        | 18,0       |
|           | 8,1                 | 3.098      | 898        | 2.200      | 2.403       | -           | 1.230      | 79         |            |

Tabela III. 4 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LF no CNPSA/EMBRAPA, no período de março de 1996 a agosto de 1997.

| MESES     | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |             |            |            |           |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|-----------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO<br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l | Tem<br>°C |
| Março     | 8,1                 | 2.797      | 1.221      | 1.576      | 546         | 350         | 737        | 49         | 23,0      |
|           | 8,1                 | 1.387      | 778        | 609        | 363         | 100         | 169        | 29         |           |
| Abril     | 7,9                 | 3.248      | 2.141      | 1.107      | 997         | 686         | 1.116      | 46         | 22,8      |
|           | 8,0                 | 1.668      | 997        | 671        | 485         | 295         | 281        | 30         |           |
| Maio      | 7,8                 | 3.910      | 2.400      | 1.511      | 1.437       | 988         | 1.167      | 67         | 20,6      |
|           | 8,0                 | 2.814      | 1.803      | 1.012      | 872         | 530         | 562        | 49         |           |
| Junho     | 7,7                 | 4.064      | 2.321      | 1.743      | 2.004       | 1.200       | 1.197      | 76         | 15,5      |
|           | 8,0                 | 2.276      | 1.537      | 740        | 875         | 400         | 451        | 35         |           |
| Julho     | 7,7                 | 3.748      | 2.398      | 1.350      | 2.261       | -           | 1.286      | 62         | 10,4      |
|           | 7,9                 | 2.036      | 1.249      | 787        | 815         | -           | 574        | 30         |           |
| Agosto    | 7,6                 | 3.359      | 2.070      | 1.289      | 1.897       | -           | 1.035      | 78         | 16,2      |
|           | 7,8                 | 1.819      | 1.066      | 753        | 930         | -           | 432        | 53         |           |
| Setembro  | 7,6                 | 3.520      | 2.027      | 1.493      | 1.413       | -           | 1.020      | 78         | 20,4      |
|           | 7,9                 | 1.752      | 980        | 771        | 780         | -           | 304        | 43         |           |
| Outubro   | 7,6                 | 3.528      | 1.961      | 1.567      | 1.576       | 575         | 1.127      | 74         | 22,5      |
|           | 7,8                 | 1.696      | 964        | 733        | 673         | 302         | 352        | 41         |           |
| Novembro  | 7,1                 | 2.974      | 1.562      | 1.412      | 1.226       | 900         | 933        | 76         | 24,1      |
|           | 7,3                 | 1.597      | 837        | 760        | 639         | 313         | 312        | 43         |           |
| Dezembro  | 7,7                 | 3.057      | 2.026      | 1.031      | 1.258       | 737         | 905        | 54         | 25,8      |
|           | 7,8                 | 2.071      | 1.253      | 818        | 835         | 327         | 383        | 50         |           |
| Janeiro   | 8,1                 | 3.163      | 1.888      | 1.275      | 1.278       | 1.050       | 764        | 74         | 26,4      |
|           | 8,2                 | 3.122      | 1.950      | 1.172      | 1.314       | 605         | 332        | 67         |           |
| Fevereiro | 8,1                 | 2.930      | 1.849      | 1.081      | 1.850       | 1.450       | 786        | 29         | 24,7      |
|           | 8,2                 | 2.577      | 1.624      | 953        | 890         | 620         | 393        | 26         |           |
| Maio      | 7,6                 | 2.995      | 2.087      | 908        | 1.124       | 775         | 637        | 62         | 19,2      |
|           | 7,6                 | 2.971      | 2.064      | 907        | 789         | 537         | 379        | 62         |           |
| Junho     | 7,2                 | 3.439      | 2.259      | 1.180      | 919         | 637         | 875        | 80         | 15,2      |
|           | 7,3                 | 2.687      | 1.772      | 915        | 586         | 400         | 542        | 59         |           |
| Julho     | 7,8                 | 3.390      | 1.941      | 1.449      | 1.160       | -           | 914        | 87         | 16,0      |
|           | 8,0                 | 2.637      | 1.592      | 1.045      | 640         | -           | 532        | 60         |           |
| Agosto    | 8,1                 | 3.098      | 898        | 2.200      | 2.403       | -           | 1.230      | 79         | 17,6      |
|           | 8,1                 | 2.878      | 1.065      | 1.813      | 1.487       | 527         | 607        | 75         |           |

Tabela III. 5 - Valores médios mensais obtidos para o afluente e efluente da lagoa LAG no CNPSA/EMBRAPA, no período de outubro de 1996 agosto de 1997.

| MESES     | P A R Â M E T R O S |            |            |            |             |             |            |            |            |
|-----------|---------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|           | pH                  | ST<br>mg/l | SF<br>mg/l | SV<br>mg/l | DQO<br>mg/l | DBO<br>mg/l | NT<br>mg/l | PT<br>mg/l | Temp<br>°C |
| Outubro   | 7,8                 | 1.633      | 940        | 693        | 478         | 302         | 437        | 28         | 21,7       |
|           | 7,8                 | 928        | 431        | 497        | 329         | 146         | 241        | 14         |            |
| Novembro  | 7,3                 | 1.597      | 837        | 760        | 639         | 313         | 312        | 43         | 24,2       |
|           | 7,8                 | 868        | 330        | 538        | 270         | 197         | 152        | 23         |            |
| Dezembro  | 7,8                 | 2.071      | 1.253      | 818        | 835         | 327         | 383        | 50         | 25,5       |
|           | 7,9                 | 1.208      | 714        | 494        | 366         | 197         | 190        | 26         |            |
| Janeiro   | 8,2                 | 3.122      | 1.950      | 1.172      | 1.314       | 605         | 332        | 67         | 26,1       |
|           | 7,6                 | 2.103      | 1.246      | 857        | 599         | 232         | 177        | 33         |            |
| Fevereiro | 8,2                 | 2.577      | 1.624      | 953        | 890         | 620         | 393        | 26         | 25,2       |
|           | 7,8                 | 966        | 539        | 426        | 352         | 280         | 84         | 21         |            |
| Maio      | 7,6                 | 2.971      | 2.064      | 907        | 789         | 537         | 379        | 62         | 19,8       |
|           | 7,5                 | 1.412      | 1.021      | 391        | 317         | 175         | 113        | 25         |            |
| Junho     | 7,3                 | 2.687      | 1.772      | 915        | 586         | 400         | 542        | 59         | 14,5       |
|           | 7,1                 | 1.466      | 1.029      | 437        | 225         | 127         | 222        | 25         |            |
| Julho     | 8,0                 | 2.637      | 1.592      | 1.045      | 640         | -           | 532        | 60         | 17,5       |
|           | 7,8                 | 1.099      | 593        | 506        | 298         | -           | 179        | 23         |            |
| Agosto    | 8,1                 | 2.878      | 1.065      | 1.813      | 1.487       | 527         | 607        | 75         | 17,9       |
|           | 8,0                 | 1.077      | 407        | 600        | 447         | 393         | 160        | 28         |            |

## ANEXO IV

Quadro IV.1 - Custos orçados de escavação mecânica e acerto de taludes, praticados pelo CIDASC - Centro Integrado de Desenvolvimento Agropecuário de Santa Catarina.

| Volume (m <sup>3</sup> ) | Custo (R\$) | Volume (m <sup>3</sup> ) | Custo (R\$) |
|--------------------------|-------------|--------------------------|-------------|
| 40                       | 69,00       | 196                      | 184,00      |
| 40                       | 69,00       | 196                      | 172,00      |
| 56                       | 69,00       | 210                      | 115,00      |
| 68                       | 69,00       | 216                      | 261,00      |
| 70                       | 92,00       | 220                      | 253,00      |
| 72                       | 92,00       | 225                      | 199,00      |
| 75                       | 103,00      | 230                      | 230,00      |
| 80                       | 92,00       | 250                      | 230,00      |
| 87                       | 92,00       | 250                      | 241,00      |
| 96                       | 161,00      | 268                      | 184,00      |
| 96                       | 115,00      | 270                      | 253,00      |
| 112                      | 138,00      | 280                      | 264,00      |
| 120                      | 126,00      | 300                      | 322,00      |
| 135                      | 138,00      | 300                      | 218,00      |
| 135                      | 149,00      | 315                      | 172,00      |
| 144                      | 149,00      | 320                      | 341,00      |
| 144                      | 172,00      | 320                      | 341,00      |
| 150                      | 138,00      | 340                      | 230,00      |
| 150                      | 272,00      | 360                      | 268,00      |
| 150                      | 149,00      | 375                      | 345,00      |
| 162                      | 276,00      | 400                      | 390,00      |
| 168                      | 168,00      | 870                      | 498,00      |
| 170                      | 161,00      | -                        | -           |

Quadro IV.2 - Custos orçados para vinimanta de PVC flexível plana de espessura 0,5 mm para revestimento das lagoas praticados pela IRRIGATER - Irrigação e Meio Ambiente (R\$ 4,50/m<sup>2</sup>).

| <b>Volume (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Área (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Plano Aberto (m)</b> | <b>Valor Superior (m)</b> | <b>Valor Inferior (m)</b> | <b>Custo (R\$)</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| 50                            | 96                          | 8,35 x 11,50            | 5,35 x 8,50               | 1,35 x 4,50               | 432,00             |
| 75                            | 120                         | 8,35 x 14,50            | 5,35 x 11,40              | 1,35 x 7,40               | 540,00             |
| 100                           | 134                         | 10,35 x 13,00           | 7,35 x 10,00              | 3,35 x 6,00               | 603,00             |
| 150                           | 165                         | 12,50 x 13,20           | 9,50 x 10,20              | 5,50 x 6,20               | 742,50             |
| 200                           | 205                         | 12,50 x 16,40           | 9,50 x 13,40              | 5,50 x 9,40               | 922,50             |
| 250                           | 235                         | 12,50 x 18,80           | 9,50 x 15,80              | 5,50 x 11,80              | 1.057,50           |
| 300                           | 266                         | 12,80 x 20,80           | 9,80 x 17,80              | 5,80 x 13,80              | 1.197,00           |
| 350                           | 301                         | 14,50 x 20,80           | 11,50 x 17,80             | 7,50 x 13,80              | 1.354,50           |
| 400                           | 336                         | 16,20 x 20,80           | 13,20 x 17,80             | 9,20 x 13,80              | 1.512,00           |
| 450                           | 374                         | 16,70 x 22,40           | 13,70 x 19,40             | 9,70 x 15,80              | 1.683,00           |
| 500                           | 392                         | 16,70 x 23,50           | 13,70 x 20,50             | 9,70 x 16,50              | 1.764,00           |
| 600                           | 432                         | 17,30 x 25,00           | 14,30 x 22,00             | 10,30 x 18,00             | 1.944,00           |
| 700                           | 475                         | 19,00 x 25,00           | 16,00 x 22,00             | 12,00 x 18,00             | 2.137,50           |
| 800                           | 540                         | 20,80 x 26,00           | 17,80 x 23,00             | 13,80 x 19,00             | 2.430,00           |
| 900                           | 588                         | 20,80 x 28,30           | 17,80 x 25,30             | 13,80 x 21,30             | 2.646,00           |
| 1.000                         | 642                         | 22,00 x 29,20           | 19,00 x 26,20             | 15,00 x 22,20             | 2.889,00           |
| 1.100                         | 692                         | 23,70 x 29,20           | 20,70 x 26,20             | 16,70 x 22,20             | 3.114,00           |
| 1.200                         | 745                         | 25,00 x 29,80           | 22,00 x 26,80             | 18,00 x 22,80             | 3.352,50           |
| 1.300                         | 800                         | 25,00 x 32,00           | 22,00 x 29,00             | 18,00 x 25,00             | 3.600,00           |
| 1.400                         | 858                         | 25,00 x 34,30           | 22,00 x 31,30             | 18,00 x 27,30             | 3.862,00           |

Quadro IV.3 - Custos orçados de manutenção, conservação e limpeza de áreas de circulação das lagoas de estabilização, praticados pela Empresa TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.

| Área (ha) | Área (m <sup>2</sup> ) | Custo Orçado (R\$) |
|-----------|------------------------|--------------------|
| 0,1       | 1.000                  | 30,00              |
| 0,2       | 2.000                  | 60,00              |
| 0,3       | 3.000                  | 90,00              |
| 0,4       | 4.000                  | 120,00             |
| 0,5       | 5.000                  | 150,00             |
| 0,6       | 6.000                  | 180,00             |
| 0,7       | 7.000                  | 210,00             |
| 0,8       | 8.000                  | 240,00             |
| 0,9       | 9.000                  | 270,00             |
| 1,0       | 10.000                 | 300,00             |
| 1,2       | 12.000                 | 348,00             |
| 1,5       | 15.000                 | 435,00             |
| 2,0       | 20.000                 | 580,00             |
| 2,5       | 25.000                 | 700,00             |
| 3,0       | 30.000                 | 840,00             |
| 3,5       | 35.000                 | 980,00             |
| 4,0       | 40.000                 | 1.088,00           |
| 5,0       | 50.000                 | 1.326,00           |
| 7,0       | 70.000                 | 1.770,00           |
| 10,0      | 100.000                | 2.363,00           |
| 12,0      | 120.000                | 2.732,00           |
| 15,0      | 150.000                | 3.255,00           |
| 20,0      | 200.000                | 4.166,00           |
| 30,0      | 300.000                | 5.851,00           |
| 50,0      | 500.000                | 8.792,00           |

Quadro IV.4 - Custos orçados de limpeza, de escavação mecânica e de compactação do solo das lagoas de estabilização, praticados pela Empresa TERRAPLANAGEM CANHANDUBA LTDA.

| <b>Volume ( m<sup>3</sup> )</b> | <b>Custo Orçado (R\$)</b> |
|---------------------------------|---------------------------|
| 100                             | 800,00                    |
| 200                             | 1.400,00                  |
| 300                             | 1.800,00                  |
| 400                             | 2.400,00                  |
| 500                             | 2.500,00                  |
| 600                             | 3.000,00                  |
| 700                             | 3.500,00                  |
| 800                             | 4.000,00                  |
| 1.000                           | 4.500,00                  |
| 1.200                           | 4.800,00                  |
| 1.500                           | 5.790,00                  |
| 1.700                           | 6.568,00                  |
| 2.000                           | 7.728,00                  |
| 2.500                           | 9.670,00                  |
| 3.000                           | 11.604,00                 |
| 3.500                           | 13.538,00                 |
| 4.000                           | 15.472,00                 |
| 5.000                           | 19.340,00                 |
| 7.000                           | 27.076,00                 |

## ANEXO V

Uma vez obtidas as taxas de degradação  $k$  da DBO para as lagoas anaeróbias LA1 e LA2, para a lagoa facultativa LF e para a lagoa de aguapés LAG, a eficiência destas lagoas podem ser determinadas através das equações (5.11 - 5.13), e observadas nas Figuras V.1 a V.4. Os valores das constantes das respectivas equações são:

$$\mu_1 = 1 \text{ e } \lambda_1 = 9,9 \text{ (dia) para a lagoa LA1;}$$

$$\mu_2 = 1 \text{ e } \lambda_2 = 26,3 \text{ (dia) para a lagoa LA2;}$$

$$\mu_3 = 1 \text{ e } \lambda_3 = 26,3 \text{ (dia) para a lagoa LF;}$$

$$\mu_4 = 1 \text{ e } \lambda_4 = 16,9 \text{ (dia) para a lagoa LAG.}$$

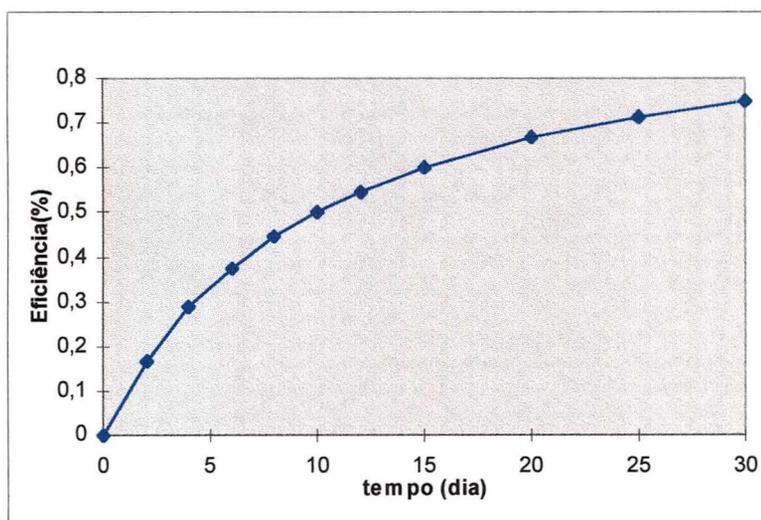


Fig. V.1 - Eficiência da DBO da lagoa anaeróbia LA1 com o tempo de detenção

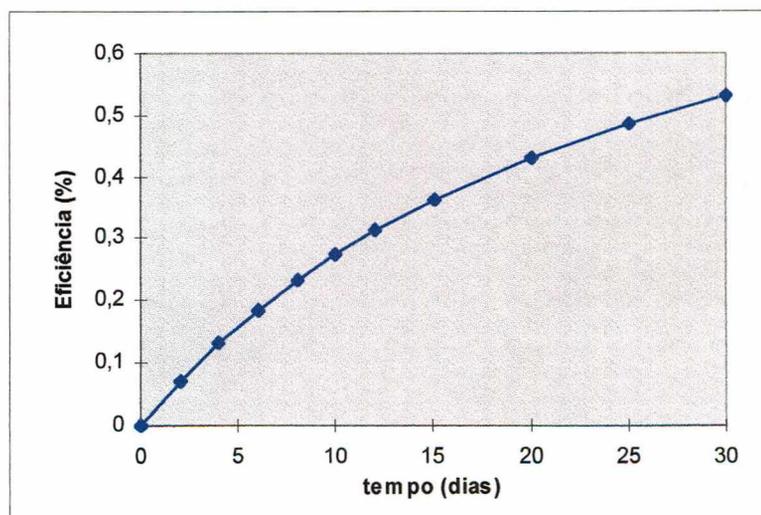


Fig. V.2 - Eficiência da DBO da lagoa anaeróbia LA2 com o tempo de detenção

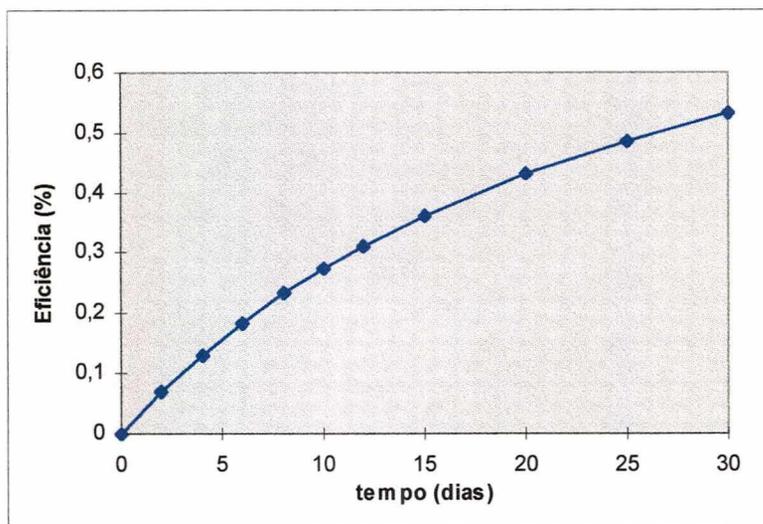


Fig V.3 - Eficiência da DBO da lagoa facultativa LF com o tempo de detenção

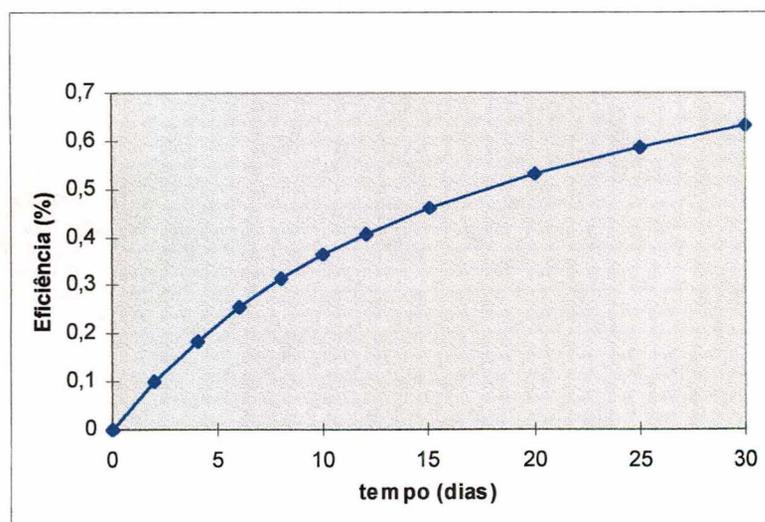


Fig. V.4 - Eficiência da DBO da lagoa de aguapés LAG com o tempo de detenção

Obtendo-se as taxas de degradação  $k$  do **Nitrogênio** para as lagoas facultativa LF e de aguapés LAG, a eficiência destas lagoas podem ser determinadas através das equações (5.50 - 5.52), e observadas nas Figuras V.5 e V.6. Os valores das constantes das respectivas equações são:

$\mu_1 = 1$  e  $\lambda_1 = 16,7$  (dia) para a lagoa LF;

$\mu_2 = 1$  e  $\lambda_2 = 13,5$  (dia) para a lagoa LAG.

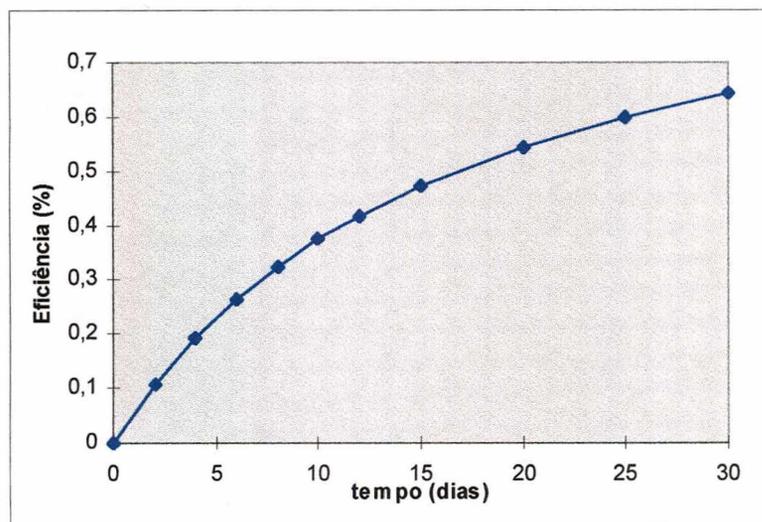


Fig. V.5 - Eficiência do NT da lagoa facultativa LF com o tempo de detenção

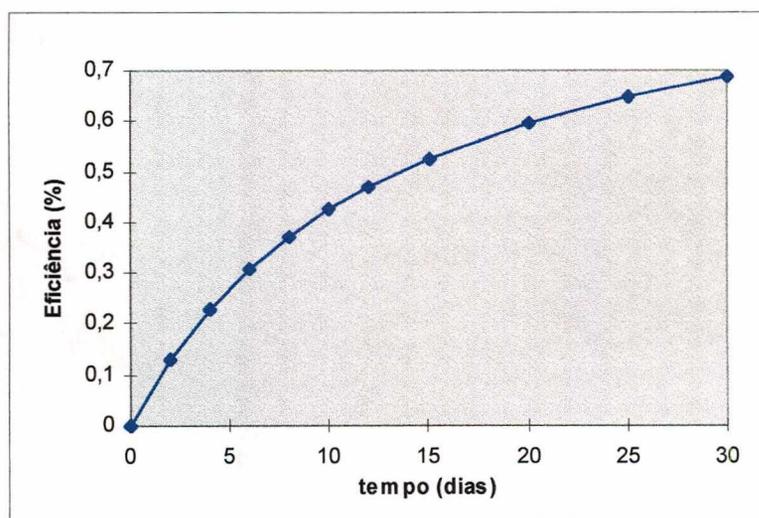


Fig. V.6 - Eficiência do NT da lagoa de aguapés LAG com o tempo de detenção

## ANEXO VI

A viabilidade da implantação do sistema contendo quatro lagoas, sendo duas anaeróbias LA1 e LA2, uma facultativa LF e uma de aguapés LAG, cujos resultados operacionais das lagoas são os obtidos na UNETDS. Neste caso não foi considerado o custo de revestimento das lagoas, mas sim, o modelo matemático dos custos de escavação mecânica e compactação das lagoas dado pela equação (5.80), tal que:

$$C_{et} = 5,914 V^{0,950}$$

Neste caso, a minimização de custos para a remoção da DBO é dada pela equação;

$$\begin{aligned} \text{Min } C_T = & [Q \ 9,9 \ (X_1^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,80 \times 0,3) + 5,914 [Q \ 9,9 \ (X_1^{-1} - 1)^{-1}]^{0,950} + \\ & [Q \ 26,3 \ (X_2^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 0,65 \times 0,3) + 5,914 [Q \ 26,3 \ (X_2^{-1} - 1)^{-1}]^{0,950} + \\ & [Q \ 26,3 \ (X_3^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,914 [Q \ 26,3 \ (X_3^{-1} - 1)^{-1}]^{0,950} + \\ & [Q \ 16,9 \ (X_4^{-1} - 1)^{-1}] (2,0 \times 1,10 \times 0,3) + 5,914 [Q \ 16,9 \ (X_4^{-1} - 1)^{-1}]^{0,950} + \\ & 64,3 \times 0,164 \{Q [0,80 \times 9,9 \ (X_1^{-1} - 1)^{-1} + 0,65 \times 26,3 \ (X_2^{-1} - 1)^{-1} + \\ & 1,10 \times 26,3 \ (X_3^{-1} - 1)^{-1} + 2^{(1/0,830)} 0,10 \times 16,9 \ (X_4^{-1} - 1)^{-1}] \}^{0,830} \end{aligned}$$

$$\text{s.a.} \quad 1 - (1 - X_1) (1 - X_2) (1 - X_3) (1 - X_4) \geq X_d \text{ (Eficiência desejada)}$$

## Exemplo

Quadro VI.1 - Características físicas das lagoas e custos da terra, de escavação mecânica e compactação e de manutenção do sistema, após a aplicação do modelo, supondo-se vazão de 30 m<sup>3</sup>/dia e eficiência do sistema de 98% de DBO.

| <b>Eficiência da lagoa</b>  | <b>Tempo detenção (dias)</b> | <b>Volume da lagoa (m<sup>3</sup>)</b> | <b>Área da lagoa (m<sup>2</sup>)</b> |
|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| E <sub>1</sub> = 0,826      | t <sub>1</sub> = 47          | V <sub>1</sub> = 1.414                 | A <sub>1</sub> = 1.131               |
| E <sub>2</sub> = 0,565      | t <sub>2</sub> = 34          | V <sub>2</sub> = 1.026                 | A <sub>2</sub> = 667                 |
| E <sub>3</sub> = 0,466      | t <sub>3</sub> = 23          | V <sub>3</sub> = 688                   | A <sub>3</sub> = 756                 |
| E <sub>4</sub> = 0,504      | t <sub>4</sub> = 17          | V <sub>4</sub> = 515                   | A <sub>4</sub> = 567                 |
| <b>Custo da terra (R\$)</b> | <b>Custo escavação (R\$)</b> | <b>Custo revestimento (R\$)</b>        | <b>Custo manutenção (R\$)</b>        |
| C <sub>t1</sub> = 814,36    | C <sub>em1</sub> = 5.817,77  | C <sub>re1</sub> = -                   | C <sub>ma1</sub> = 2.952,08          |
| C <sub>t2</sub> = 479,95    | C <sub>em2</sub> = 4.288,29  | C <sub>re2</sub> = -                   | C <sub>ma2</sub> = 1.739,83          |
| C <sub>t3</sub> = 544,67    | C <sub>em3</sub> = 2.933,72  | C <sub>re3</sub> = -                   | C <sub>ma3</sub> = 1.974,44          |
| C <sub>t4</sub> = 408,20    | C <sub>em4</sub> = 2.230,61  | C <sub>re4</sub> = -                   | C <sub>ma4</sub> = 2.959,48          |
| <b>Total: 2.247,18</b>      | <b>15.270,39</b>             | -                                      | <b>9.625,84</b>                      |

**Custo Total do Sistema: R\$ 27.143,42**

## ANEXO VII

Divulgação dos Resultados através de artigos apresentados em congressos científicos, com publicação integral em anais:

### 1. AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE SISTEMA DE TRATAMENTO: DECANTADOR DE PALHETAS E LAGOA ANAERÓBIA PARA DEJETOS DE SUÍNOS

III SIBESA - Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Organizado pela ABES/ANDIS/AIDIS, no período de 09 a 13 de junho de 1996, Gramado - RS.

Autores: Waldir Medri, Rejane Helena Ribeiro da Costa e Carlos Cláudio Perdomo.

### 2. ESTUDO ECONÔMICO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE SISTEMA DE TRATAMENTO: LAGOAS ANAERÓBIA E FACULTATIVA PARA DEJETOS SUÍNOS

XXV Congreso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental - Tratamento de Aguas Residuarias.

Organizado pela AIDIS/SMISAAC, no período de 03 a 07 de novembro de 1996, México, D.F.

Autores: Waldir Medri, Rejane Helena Ribeiro da Costa e Carlos Cláudio Perdomo.

### 3. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO: DECANTADOR DE PALHETAS E LAGOAS ANAERÓBIAS, FACULTATIVA E DE AGUAPÉS DE DEJETOS DE SUÍNOS

SIDISA - Simposio Internazionale di Ingegneria Sanitaria Ambientale.

Organizado pela AIDIS/ABES/ANDIS, no período de 03 a 07 de junho de 1997, Ravello - Itália.

Autores: Rejane Helena Ribeiro da Costa, Waldir Medri e Carlos Cláudio Perdomo.

### 4. LAGOAS DE AGUAPÉS PARA DEJETOS DE SUÍNOS

SIDISA - Simposio Internazionale di Ingegneria Sanitaria Ambientale.

Organizado pela AIDIS/ABES/ANDIS, no período de 03 a 07 de junho de 1997, Ravello - Itália.

Autores: Rejane Helena Ribeiro da Costa, Angelita Silveira L. Bavaresco e Waldir Medri.

### 5. DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE DEGRADAÇÃO (K) DE SISTEMA DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO DE DEJETOS SUÍNOS

19<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Organizado pela ABES, no período de 14 a 19 de setembro de 1997, Foz do Iguaçu, Pr.

Autores: Rejane Helena Ribeiro da Costa, Waldir Medri, Fábio Cruz Manhães da Silva e Carlos Cláudio Perdomo.