

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

**A VERMICOMPOSTAGEM APLICADA AO TRATAMENTO  
DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO**

**GERALDO ANTÔNIO REICHERT**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

**PORTO ALEGRE, RS**  
**DEZEMBRO / 1999**

Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Biblioteca – IPH–UFRGS

Reichert, Geraldo Antônio

A vermicompostagem aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário / Geraldo Antônio Reichert. – Porto Alegre: UFRGS, 1999.  
137p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR–RS, 1999.

1. Resíduos sólidos. 2. Tratamento de lixiviado. 3. Vermicompostagem.  
4. Chorume. 5. Minhocas. I. Bidone, Francisco Ricardo Andrade, orient. II. Título.

CDU 628.4



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E  
SANEAMENTO AMBIENTAL

RESULTADO DO EXAME DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÍTULO: "A vermicompostagem aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário".

MESTRANDO: GERALDO ANTONIO REICHERT

INGRESSO: 1996/1

ORIENTADOR: Prof. Francisco Ricardo Bidone

CO-ORIENTADOR:

MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA:

| NOME                     | ASSINATURA | CONCEITO |
|--------------------------|------------|----------|
| Prof. Gino Gehling       |            | A        |
| Prof. Jurandyr Povinelli |            | A        |
| Prof. Renato Machado     |            | A        |

CONCEITO FINAL: A

Porto Alegre, 21 de dezembro de 1999.

**Ao Presidente da Banca Examinadora:**

Elimine uma das alternativas a baixo.

1. Este documento é **provisório**. O mestrando tem 45 dias para apresentar as correções solicitadas pela banca, ao final do qual se expira a validade do mesmo.
2. Este documento é **definitivo**. O mestrando satisfaz as exigências da banca e o seu trabalho não tem correções a serem feitas.

***“O que vier a acontecer com a Terra recairá sobre os filhos da Terra. Não foi o homem quem fez o tecido da vida. Ele é simplesmente um de seus fios. O que quer que faça ao tecido estará fazendo a si mesmo.”***

Chefe Índio de Seathl (Seattle), líder da Tribo Suwamish, em trecho da carta enviado ao Presidente Norte-Americano Franklin Pierce, 1855.

## APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Ricardo Andrade Bidone, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A pesquisa faz parte do Programa de Incentivo Acadêmico às Demandas Municipais, convênio firmado entre a Prefeitura Municipal de Porto Alegre e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, aqui representados pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana – DMLU, e pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH. O estudo se insere no tema “*Estudo de Alternativas para Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário*”, protocolado sob o nº 23078036449/95-14 na UFRGS.

A pesquisa também teve o apoio do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, gerido pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), em torno do tema “*Metodologias e Técnicas de Minimização, Reciclagem e Reutilização de Resíduos Sólidos Urbanos*”, convênio PROSAB nº 6696061300.

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Francisco Ricardo Andrade Bidone, pela eficiente orientação, apoio, motivação constante, amizade e confiança que me brindou durante a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do IPH/UFRGS, pelas oportunidades de aprendizado.

Ao Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) pela liberação parcial, e pelas oportunidades de crescimento e aprimoramento profissional. Também pelo apoio na realização de algumas análises e pelo cedência e transporte do lixiviado utilizado.

À FINEP, pelo subsídio parcial dos procedimentos analíticos.

Ao CNPq, pela cedência de recursos humanos (bolsistas).

À Prefeitura Municipal de Ivoti/RS, pelo composto de resíduos urbanos cedido.

A Romeu Leopoldo Haas, pelo estrume bovino cedido.

Ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, pela realização de algumas análises.

Aos técnicos do Laboratório de Tecnologias Ambientais do IPH/UFRGS, pela inestimável ajuda na realização das análises.

Aos colegas de curso, pelo incentivo e convívio intenso, principalmente ao Eng. Sérgio Cotrim, pela amizade e sugestões na realização deste trabalho;

Aos meus pais, Alfredo e Lúcia, pelo amor e carinho, e pelo testemunho de trabalho e retidão.

Aos meus irmãos, Carmem, Zé Miguel, Ciça, Seno, Ita e Lena, pela amizade e amor fraterno.

À Andreana, esposa, companheira, amiga, cúmplice e minha grande incentivadora; e aos meus filhos Tiago, Helena e Heloísa, razão de meu trabalho, pelas horas de companhia e de brincadeiras que lhes furtei.

## RESUMO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos ainda é caótico no Brasil. Felizmente, cada dia que passa esta realidade vai se transformando, com a implantação, entre outras alternativas, de aterros sanitários. O tratamento adequado do lixiviado produzido nestes aterros, ainda permanece um problema não resolvido em definitivo, com diversas alternativas sendo propostas e aplicadas.

Este trabalho vem contribuir na busca de soluções simples através do estudo da vermicompostagem como forma alternativa de tratamento de lixiviado de células antigas de aterro sanitário, contando-se com a capacidade quelante e complexante do húmus no arrefecimento das cargas poluidoras do lixiviado. Para isto foram utilizados como substratos orgânicos o composto de resíduos sólidos urbanos e uma mistura deste composto com estrume bovino. O estudo foi dividido em quatro diferentes fases, sendo a eficiência do processo analisada para leiras de altura tradicional e de maior profundidade, tendo as últimas recebido o insuflamento mecânico de ar pela base. Em cada fase foram testadas quatro taxas de aplicação do lixiviado, taxas estas que foram definidas em função da pluviometria média de Porto Alegre.

A minhoca utilizada foi a vermelha da Califórnia, a *Eisenia foetida*, pela simplicidade do seu manejo e sua fácil adaptação em cativeiro.

O lixiviado foi proveniente do Aterro Zona Norte de Porto Alegre, já bastante biodegradado, mas ainda com altas concentrações de nitrogênio, visto já ter sofrido tratamento anaeróbio no próprio aterro.

A condução do experimento se deu no Laboratório de Tecnologias Ambientais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, através da montagem das leiras em bancada, utilizando vasos plásticos e cerâmicos, com duração aproximada de dez meses.

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostraram que a vermicompostagem, e o vermicomposto, quando submetido a rega com lixiviado de aterro velho, proporcionou efetiva remoção das cargas de matéria orgânica, de metais pesados e principalmente de nitrogênio total de Kjeldhal.

## ABSTRACT

Urban solid waste management is still chaotic in Brazil. Fortunately, this reality is going changing, with the implantation of sanitary landfills, among other alternatives. The appropriate treatment of the leachate produced in these landfills is still a problem to be completely solved, with several alternatives being proposed and applied.

This work contributes in the search of simple solutions through the study of the vermicomposting as an alternative form of leachate treatment from old cells of sanitary landfills, taking into account the humus attenuation capacity in attenuating the leachate pollutants loads. For this, compost of urban solid waste and a mix of this compost with cattle manure were used as organic substrates. The study was divided in four different phases, where the efficiency of the process was analyzed for piles of traditional height and larger depth, where the last ones received the mechanical input of air from the base. In each phase four leachate application rates were tested, which were defined based on the mean rainfall precipitation of Porto Alegre City.

The earthworm used was the California red worm, *Eisenia foetida*, because of the simplicity of its management and adaptation to captivity.

The leachate was originated from the Zona Norte Landfill of Porto Alegre, already highly biodegraded, but still with high concentrations of nitrogen, because it had already suffered anaerobic treatment inside the landfill.

The experiment was conducted at the Laboratory of Environmental Technologies of the Institute of Hydraulic Researches of UFRGS, through the building of the piles in laboratory, using plastic and ceramic vases, with an approximate duration of ten months.

The results obtained showed that the vermicomposting, and the vermicompost, when submitted to watering with old landfill leachate provided effective removal of organic matter, heavy metals and mainly Kjeldhal total nitrogen loads.



## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 1  |
| 2. OBJETIVOS .....  | 3  |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....  | 4  |
| 3.1. O problema crescente dos resíduos sólidos .....                          | 4  |
| 3.2. Caracterização dos resíduos sólidos .....                                | 5  |
| 3.2.1. Classificação .....  | 5  |
| 3.2.2. Composição .....   | 8  |
| 3.3. O aterro sanitário .....   | 8  |
| 3.3.1. Aspectos construtivos, de proteção e segurança ambiental .....         | 8  |
| 3.3.2. O ecossistema aterro sanitário .....                                   | 9  |
| 3.3.2.1. Degradação anaeróbia de compostos orgânicos .....                    | 9  |
| 3.3.2.2. Microbiologia da degradação anaeróbia .....                          | 12 |
| 3.3.3. Geração e caracterização do lixiviado .....                            | 16 |
| 3.3.3.1. Geração do lixiviado .....   | 16 |
| 3.3.3.2. Caracterização do lixiviado .....                                    | 18 |
| 3.4. Tratabilidade e problemas relacionados ao lixiviado .....                | 21 |
| 3.4.1. Variabilidade da vazão e da composição .....                           | 21 |
| 3.4.2. Influência da idade do aterro .....                                    | 22 |
| 3.4.3. Tratamentos aeróbios e anaeróbios do lixiviado .....                   | 26 |
| 3.4.4. Toxicidade e inibição .....  | 28 |
| 3.5. Sistemas de tratamento do lixiviado .....                                | 30 |
| 3.5.1. Introdução .....   | 30 |
| 3.5.2. Métodos convencionais .....  | 31 |
| 3.5.2.1. Tratamento biológico .....   | 31 |
| 3.5.2.2. Tratamento físico-químico .....                                      | 38 |
| 3.5.3. Propostas alternativas .....   | 41 |
| 3.5.4. Adequação e aplicabilidade dos diferentes métodos .....                | 45 |
| 3.6. A vermicompostagem como proposta de tratamento .....                     | 46 |
| 3.6.1. Descrição sucinta do processo da vermicompostagem .....                | 46 |
| 3.6.2. Algumas características das minhocas .....                             | 47 |
| 3.6.3. A vermicompostagem no tratamento de resíduos sólidos .....             | 48 |
| 3.6.4. Utilização da vermicompostagem para tratamento do lixiviado .....      | 52 |
| 4. METODOLOGIA .....  | 54 |
| 4.1. Os substratos orgânicos utilizados na pesquisa .....                     | 54 |
| 4.2. Procedência, caracterização e conservação dos lixiviados afluentes ..... | 55 |
| 4.3. Determinação dos parâmetros físico-químicos das amostras líquidas .....  | 57 |
| 4.4. Montagem e condução do experimento .....                                 | 58 |
| 4.4.1. Fase 1 .....   | 58 |
| 4.4.1.1. Preparação dos vasos .....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4.1.2. Procedimento preliminar à inoculação com as minhocas .....   | 59 |
| 4.4.1.3. Inoculação das leiras .....  | 61 |
| 4.4.1.4. Taxas de aplicação do lixiviado afluyente .....  | 61 |
| 4.4.1.5. Sistemática de rega .....  | 61 |
| 4.4.2. Fase 2 .....   | 62 |
| 4.4.3. Fase 3 .....   | 62 |
| 4.4.3.1. Preparação das leiras .....  | 62 |
| 4.4.3.2. Procedimento preliminar à inoculação com as minhocas .....   | 63 |
| 4.4.3.3. Inoculação das leiras .....  | 63 |
| 4.4.3.4. Taxas de aplicação do lixiviado afluyente .....  | 63 |
| 4.4.3.5. Sistemática de rega .....  | 64 |
| 4.4.3.6. Insuflamento de ar no interior das leiras .....  | 64 |
| 4.4.4. Fase 4 .....   | 65 |
| 4.5. Coleta e preservação das amostras dos percolados efluentes .....   | 68 |
| 4.5.1. Coleta do percolado efluente .....   | 68 |
| 4.5.2. Preservação das amostras .....   | 68 |
| 4.6. Análise dos substratos sólidos .....   | 68 |
| 4.7. Dinâmica das minhocas .....  | 69 |
| 4.8. Tratamento estatístico .....   | 69 |
| 5. RESULTADOS .....   | 71 |
| 5.1. Caracterização físico-química dos substratos sólidos básicos utilizados .....  | 71 |
| 5.2. Fase 1 .....   | 71 |
| 5.2.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de vermicompostagem .....   | 71 |
| 5.2.2. Caracterização do líquido percolado da leira, resultante da rega com água deionizada, no período anterior à aplicação do lixiviado ..... | 72 |
| 5.2.3. Caracterização do lixiviado bruto .....  | 73 |
| 5.2.4. Resultados das análises do percolado de cada leira .....   | 74 |
| 5.2.4.1. DQO .....  | 74 |
| 5.2.4.2. NTK .....  | 76 |
| 5.2.4.3. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....   | 78 |
| 5.2.4.4. Metais pesados .....   | 79 |
| 5.2.4.5. Ácidos voláteis .....  | 81 |
| 5.3. Fase 2 .....   | 83 |
| 5.3.1. Caracterização do lixiviado bruto .....  | 83 |
| 5.3.2. Resultados das análises do percolado de cada leira .....   | 83 |
| 5.3.2.1. DQO .....  | 84 |
| 5.3.2.2. DBO .....  | 85 |
| 5.3.2.3. NTK .....  | 86 |
| 5.3.2.4. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....   | 87 |
| 5.3.2.5. Metais pesados .....   | 88 |
| 5.4. Fase 3 .....   | 90 |
| 5.4.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de vermicompostagem .....   | 90 |
| 5.4.2. Caracterização do lixiviado bruto .....  | 90 |
| 5.4.3. Resultados das análises do percolado de cada leira .....   | 90 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4.3.1. DQO .....  | 91  |
| 5.4.3.2. DBO .....  | 93  |
| 5.4.3.3. NTK .....  | 94  |
| 5.4.3.4. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....   | 96  |
| 5.4.3.5. Metais pesados .....   | 97  |
| 5.5. Fase 4 .....   | 99  |
| 5.5.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de<br>vermicompostagem .....  | 99  |
| 5.5.2. Caracterização do lixiviado bruto .....  | 99  |
| 5.5.3. Resultados das análises do percolado de cada leira .....   | 100 |
| 5.5.3.1. DQO .....  | 100 |
| 5.5.3.2. DBO .....  | 101 |
| 5.5.3.3. NTK .....  | 102 |
| 5.5.3.4. NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....   | 103 |
| 5.5.3.5. Metais pesados .....   | 104 |
| 5.6. Dinâmica da população de minhocas .....  | 105 |
| 5.6.1. Fase 1 .....   | 105 |
| 5.5.2. Fase 3 .....   | 107 |
| 6. DISCUSSÃO .....  | 109 |
| 6.1. Concentrações nos substratos sólidos .....   | 109 |
| 6.2. Dinâmica das minhocas .....  | 110 |
| 6.3. Lixiviado bruto afluyente .....  | 113 |
| 6.4. Eficiências na remoção/atenuação de poluentes .....  | 114 |
| 6.4.1. Carga orgânica (DQO e DBO) .....   | 114 |
| 6.4.2. Nitrogênio .....   | 117 |
| 6.4.3. Metais pesados .....   | 118 |
| 6.4.4. Ácidos voláteis .....  | 120 |
| 6.4.5. Comparação entre as quatro fases .....   | 120 |
| 6.5. Análise das taxas de aplicação de lixiviado utilizadas .....   | 121 |
| 6.6. Análise estatística .....  | 122 |
| 6.7. Comparação com os limites de emissão de efluentes líquidos<br>no Estado do Rio Grande do Sul .....                                   | 124 |
| 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....   | 127 |
| 7.1. Conclusões .....   | 127 |
| 7.2. Recomendações .....  | 129 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 130 |
| 9. ANEXOS .....   | 137 |
| Anexo A – Tabelas com os resultados analíticos das quatro fases da pesquisa .....   | A   |
| Anexo B – Gráficos dos volumes percolados e das concentrações no efluente .....   | B   |
| Anexo C – Tabelas de comparação com os padrões de emissão de efluentes<br>da SSMA – Secretaria Estadual da Saúde e do Meio Ambiente ..... | C   |
| Anexo D – Tabelas de análise estatística .....  | D   |

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 3.1  | Classificação dos resíduos sólidos urbanos, conforme sua origem, percentagem em peso .....   | 7   |
| Figura 3.2  | Fases metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia .....  | 14  |
| Figura 3.3  | Alterações na composição do biogás de aterros sanitários nas diferentes fases da degradação anaeróbia .....  | 25  |
| Figura 3.4  | Alterações na composição do lixiviado de aterros sanitários nas diferentes fases da degradação anaeróbia .....   | 25  |
| Figura 4.1  | Vista aérea do Aterro Sanitário Zona Norte, e Célula 4 no detalhe .....  | 56  |
| Figura 4.2  | Detalhe da coleta de lixiviado no Aterro Sanitário Zona Norte .....  | 57  |
| Figura 4.3  | Esquema simplificado da montagem das quatro fases da pesquisa .....  | 60  |
| Figura 4.4  | Vista geral do experimento durante a Fase 1 .....  | 66  |
| Figura 4.5  | Detalhe da aplicação do lixiviado sobre as leiras da Fase 1 .....  | 66  |
| Figura 4.6  | Vista geral do experimento durante a Fase 3 (na parte superior da bancada observa-se os vasos plásticos da Fase 2). À direita, o insuflador de ar (compressor) utilizado ..... | 67  |
| Figura 4.7  | Detalhe da mangueira de injeção de ar nos vasos cerâmicos (Fases 3 e 4) .....  | 67  |
| Figura 5.1  | $\text{NH}_4^+$ e $\text{NO}_3^-$ no substrato das leiras de vermicompostagem, ao longo da Fase 1 .....  | 72  |
| Figura 5.2  | Cr, Pb e Ni no substrato das leiras de vermicompostagem, ao longo da Fase 1 .....  | 72  |
| Figura 5.3  | Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 1 .....  | 76  |
| Figura 5.4  | Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 1 .....  | 77  |
| Figura 5.5  | Cargas de $\text{NO}_3^-$ aplicadas e percoladas nas leiras da Fase 1 .....  | 79  |
| Figura 5.6  | Redução de cargas de metais pesados do lixiviado da Fase 1 .....   | 81  |
| Figura 5.7  | Cargas de ácidos voláteis aplicadas e percoladas na Fase 1 .....   | 82  |
| Figura 5.8  | Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 2 .....  | 85  |
| Figura 5.9  | Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 2 .....  | 86  |
| Figura 5.10 | Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 2 .....  | 87  |
| Figura 5.11 | Cargas de $\text{NO}_3^-$ aplicadas e percoladas nas leiras da Fase 2 .....  | 88  |
| Figura 5.12 | Redução de cargas de metais pesados do lixiviado da Fase 2 .....   | 89  |
| Figura 5.13 | Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 3 .....  | 93  |
| Figura 5.14 | Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 3 .....  | 94  |
| Figura 5.15 | Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 3 .....  | 96  |
| Figura 5.16 | Cargas de $\text{NO}_3^-$ aplicadas e percoladas nas leiras da Fase 3 .....  | 97  |
| Figura 5.17 | Redução de cargas de metais pesados do lixiviado da Fase 3 .....   | 99  |
| Figura 5.18 | Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 4 .....  | 101 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Figura 5.19 | Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 4 .....  | 102 |
| Figura 5.20 | Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 4 .....  | 103 |
| Figura 5.21 | Cargas de $\text{NO}_3^-$ aplicadas e percoladas nas leiras da Fase 4 .....                  | 104 |
| Figura 5.22 | Redução de cargas de metais pesados do lixiviado da Fase 4 .....                             | 105 |
| Figura 5.23 | Perda de massa por minhocas adultas para diferentes taxas de rega na Fase 1 .....            | 106 |
| Figura 5.24 | Perda de massa por minhocas adultas para diferentes taxas de rega na Fase 3 .....            | 108 |
| Figura 6.1  | Eficiência de remoção de carga de DQO para as diferentes taxas de aplicação .....            | 115 |
| Figura 6.2  | Eficiência de remoção de carga de DBO para as diferentes taxas de aplicação .....            | 115 |
| Figura 6.3  | Eficiência de remoção de carga de NTK para as diferentes taxas de aplicação .....            | 117 |
| Figura 6.4  | Eficiência de remoção de carga de metais pesados para as diferentes taxas de aplicação ..... | 119 |

## LISTA DE TABELAS

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabela 3.1  | Composição física de resíduos sólidos domiciliares de algumas cidades brasileiras, dos Estados Unidos e do Japão .....      | 8  |
| Tabela 3.2  | Variabilidade das características físico-químicas do lixiviado de aterro sanitário .....                                    | 19 |
| Tabela 3.3  | Concentração de metais pesados em lixiviados de aterros de diferentes idades .....  | 24 |
| Tabela 3.4  | Concentração de ácidos orgânicos voláteis em lixiviados de aterros de diferentes idades .....                               | 24 |
| Tabela 3.5  | Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios .....   | 27 |
| Tabela 3.6  | Concentrações limites de poluentes que causam inibição em processos de lodos ativados .....                                 | 29 |
| Tabela 3.7  | Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados .....  | 32 |
| Tabela 3.8  | Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados .....  | 33 |
| Tabela 3.9  | Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados, em escala real .....  | 33 |
| Tabela 3.10 | Resultados do tratamento de lixiviados com discos rotativos .....   | 36 |
| Tabela 3.11 | Condições experimentais e resultados de reator híbrido de manto de lodo e filtro .....                                      | 37 |
| Tabela 3.12 | Resultados do tratamento de lixiviados por precipitação química .....   | 39 |
| Tabela 3.13 | Resultados do tratamento de lixiviados por oxidação química .....   | 39 |
| Tabela 3.14 | Resultados do tratamento de lixiviados por carvão ativo e resinas trocadoras de íons .....                                  | 40 |
| Tabela 3.15 | Resultados do tratamento de lixiviados por osmose reversa .....   | 40 |
| Tabela 3.16 | Comparação da performance dos vários processos de tratamento de lixiviado .....   | 45 |
| Tabela 3.17 | Adequação de tratamentos em função de características específicas .....   | 45 |
| Tabela 4.1  | Parâmetros físico-químicos analisados .....   | 58 |
| Tabela 4.2  | Identificação dos vasos da Fase 1 com relação aos substratos, tipo de líquido de rega e taxas de aplicação utilizados ..... | 62 |
| Tabela 4.3  | Identificação dos vasos da Fase 3 com relação aos substratos, tipo de líquido de rega e taxas de aplicação utilizados ..... | 64 |
| Tabela 4.4  | Graus de variabilidade em relação à média em função do $C_v$ .....  | 69 |
| Tabela 5.1  | Cargas de cálcio e magnésio somadas no substrato e no percolado dos vasos (g) .....   | 73 |
| Tabela 5.2  | Cargas de DQO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1 .....   | 75 |
| Tabela 5.3  | Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1 .....   | 75 |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabela 5.4  | Cargas de NTK (mg/sem) percolada nas leiras regadas com água, Fase 1 .....   | 76  |
| Tabela 5.5  | Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1 .....  | 77  |
| Tabela 5.6  | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1 .....   | 78  |
| Tabela 5.7  | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1 .....   | 78  |
| Tabela 5.8  | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1 .....   | 80  |
| Tabela 5.9  | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1 .....   | 80  |
| Tabela 5.10 | Cargas de ácidos voláteis (acético + propiônico + butírico + iso-butírico + valérico + iso-valérico) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1 ..... | 81  |
| Tabela 5.11 | Cargas de ácidos voláteis (acético + propiônico + butírico + iso-butírico + valérico + iso-valérico) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1 .....                 | 82  |
| Tabela 5.12 | Características intrínsecas a cada leira de vermicompostagem (mistura como substrato) .....  | 83  |
| Tabela 5.13 | Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2 .....  | 84  |
| Tabela 5.14 | Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2 .....  | 85  |
| Tabela 5.15 | Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2 .....  | 86  |
| Tabela 5.16 | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2 .....   | 88  |
| Tabela 5.17 | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2 .....   | 89  |
| Tabela 5.18 | Cargas de DQO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3 .....  | 91  |
| Tabela 5.19 | Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3 .....  | 92  |
| Tabela 5.20 | Cargas de DBO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3 .....  | 93  |
| Tabela 5.21 | Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3 .....  | 94  |
| Tabela 5.22 | Cargas de NTK (mg/sem) percolada nas leiras regadas com água, Fase 3 .....   | 95  |
| Tabela 5.23 | Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3 .....  | 95  |
| Tabela 5.24 | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3 .....   | 96  |
| Tabela 5.25 | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3 .....   | 97  |
| Tabela 5.26 | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3 .....   | 98  |
| Tabela 5.27 | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3 .....   | 98  |
| Tabela 5.28 | Características intrínsecas a cada leira de vermicompostagem (composto como substrato) .....   | 100 |
| Tabela 5.29 | Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4 .....  | 101 |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Tabela 5.30 | Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4 .....   | 102 |
| Tabela 5.31 | Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4 .....   | 103 |
| Tabela 5.32 | Cargas de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4 .....  | 104 |
| Tabela 5.33 | Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem)<br>aplicadas e percoladas, Fase 4 .....   | 105 |
| Tabela 5.34 | Massa média <i>per capita</i> das minhocas durante a Fase 1 .....   | 106 |
| Tabela 5.35 | Massa média <i>per capita</i> das minhocas durante a Fase 3 .....   | 107 |
| Tabela 6.1  | Agrupamento das leiras em função da variabilidade,<br>em torno da média, da eficiência de redução de carga .....  | 123 |
| Tabela 6.2  | Agrupamento em função da variabilidade em torno da média,<br>tomando como base as quatro taxas de aplicação em cada<br>substrato sólido utilizado ..... | 124 |



## LISTA DE ANEXOS

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| Tabela A.1  | Caracterização dos substratos básicos utilizados nas Fases 1 e 2 .....  | A-1  |
| Tabela A.2  | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 1, ao início do experimento .....   | A-1  |
| Tabela A.3  | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 1, aos 30 dias do experimento .....   | A-2  |
| Tabela A.4  | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 1, aos 60 dias do experimento .....   | A-2  |
| Tabela A.5  | Caracterização do líquido percolado de cada leira, Fase 1, na semana que antecedeu o início da aplicação do lixiviado (emudecimento prévio com água deionizada) ..... | A-3  |
| Tabela A.6  | Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da Fase 1 .....   | A-3  |
| Tabela A.7  | Resultados das análises do percolado das Leiras V1 e V2, Fase 1 .....   | A-4  |
| Tabela A.8  | Resultados das análises do percolado das Leiras V3 e V4, Fase 1 .....   | A-4  |
| Tabela A.9  | Resultados das análises do percolado das Leiras V5 e V6, Fase 1 .....   | A-5  |
| Tabela A.10 | Resultados das análises do percolado das Leiras V7 e V8, Fase 1 .....   | A-5  |
| Tabela A.11 | Resultados das análises do percolado das Leiras V9 e V10, Fase 1 .....  | A-6  |
| Tabela A.12 | Resultados das análises do percolado das Leiras V11 e V12, Fase 1 .....   | A-6  |
| Tabela A.13 | Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da Fase 2 .....   | A-7  |
| Tabela A.14 | Resultados das análises do percolado da Leira V2, Fase 2 .....  | A-7  |
| Tabela A.15 | Resultados das análises do percolado da Leira V5, Fase 2 .....  | A-8  |
| Tabela A.16 | Resultados das análises do percolado da Leira V8, Fase 2 .....  | A-8  |
| Tabela A.17 | Resultados das análises do percolado da Leira V11, Fase 2 .....   | A-9  |
| Tabela A.18 | Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da Fase 3 .....   | A-9  |
| Tabela A.19 | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 3, ao início do experimento .....   | A-10 |
| Tabela A.20 | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 3, aos 30 dias do experimento .....   | A-10 |
| Tabela A.21 | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 3, aos 60 dias do experimento .....   | A-11 |
| Tabela A.22 | Resultados das análises do percolado da Leira V13, Fase 3 .....   | A-11 |
| Tabela A.23 | Resultados das análises do percolado da Leira V14, Fase 3 .....   | A-12 |
| Tabela A.24 | Resultados das análises do percolado da Leira V15, Fase 3 .....   | A-12 |
| Tabela A.25 | Resultados das análises do percolado da Leira V16, Fase 3 .....   | A-13 |

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| Tabela A.26 | Resultados das análises do percolado da Leira V17, Fase 3 .....   | A-13 |
| Tabela A.27 | Resultados das análises do percolado da Leira V18, Fase 3 .....   | A-14 |
| Tabela A.28 | Resultados das análises do percolado da Leira V19, Fase 3 .....   | A-14 |
| Tabela A.29 | Resultados das análises do percolado da Leira V20, Fase 3 .....   | A-15 |
| Tabela A.30 | Resultados das análises do percolado da Leira V21, Fase 3 .....   | A-15 |
| Tabela A.31 | Resultados das análises do percolado da Leira V22, Fase 3 .....   | A-16 |
| Tabela A.32 | Resultados das análises do percolado da Leira V23, Fase 3 .....   | A-16 |
| Tabela A.33 | Resultados das análises do percolado da Leira V24, Fase 3 .....   | A-17 |
| Tabela A.34 | Caracterização do lixiviado bruto afluente, ao longo da realização<br>da Fase 4 .....                       | A-17 |
| Tabela A.35 | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem<br>da Fase 4, ao início do experimento .....  | A-18 |
| Tabela A.36 | Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem<br>da Fase 4, aos 60dias do experimento ..... | A-18 |
| Tabela A.37 | Resultados das análises do percolado da Leira V21 e V22, Fase 4 .....                                       | A-19 |
| Tabela A.38 | Resultados das análises do percolado da Leira V23 e V24, Fase 4 .....                                       | A-19 |
| Tabela A.39 | Dinâmica da população de minhocas durante a Fase 1 .....  | A-20 |
| Tabela A.40 | Dinâmica da população de minhocas durante a Fase 3 .....  | A-20 |
| Tabela A.41 | Retenção de líquidos e umidade nas leiras, Fases 1 e 3 .....  | A-21 |
| Tabela A.42 | Retenção de líquidos e umidade nas leiras, Fases 2 e 4 .....  | A-21 |
| Tabela C.1  | Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos,<br>para DQO .....                               | C-1  |
| Tabela C.2  | Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos,<br>para DBO .....                               | C-2  |
| Tabela C.3  | Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos,<br>para NTK .....                               | C-3  |
| Tabela C.4  | Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos,<br>para $\text{NO}_3^-$ .....                   | C-4  |
| Tabela C.5  | Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos,<br>para metais .....                            | C-4  |
| Tabela D.1  | Análise de médias e coeficientes de variação para DQO<br>dentro das leiras .....                            | D-1  |
| Tabela D.2  | Análise de médias e coeficientes de variação para DBO<br>dentro das leiras .....                            | D-2  |
| Tabela D.3  | Análise de médias e coeficientes de variação para NTK<br>dentro das leiras .....                            | D-3  |
| Tabela D.4  | Análise de médias e coeficientes de variação para metais<br>dentro das leiras .....                         | D-4  |

|             |   |      |
|-------------|---|------|
| Tabela D.5  | Análise de médias e coeficientes de variação (Cv) para redução das cargas de DQO por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação .....                        | D-5  |
| Tabela D.6  | Análise de médias e coeficientes de variação (Cv) para redução das cargas de DBO por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação .....                        | D-5  |
| Tabela D.7  | Análise de médias e coeficientes de variação (Cv) para redução das cargas de NTK por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação .....                        | D-5  |
| Tabela D.8  | Análise de médias e coeficientes de variação (Cv) para redução das cargas de metais (Pb + Ni + Cd + Cr) por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação ..... | D-5  |
| Figura B.1  | Volume percolado por semana nas leiras da Fase 1 .....  | B-1  |
| Figura B.2  | Volume percolado por semana nas leiras da Fase 2 .....  | B-1  |
| Figura B.3  | Volume percolado por semana nas leiras da Fase 3 .....  | B-1  |
| Figura B.4  | Volume percolado por semana nas leiras da Fase 4 .....  | B-2  |
| Figura B.5  | Resultados de concentrações de DQO nas leiras da Fase 1 .....   | B-2  |
| Figura B.6  | Resultados de concentrações de DQO nas leiras da Fase 2 .....   | B-2  |
| Figura B.7  | Resultados de concentrações de DQO nas leiras da Fase 3 .....   | B-3  |
| Figura B.8  | Resultados de concentrações de DQO nas leiras da Fase 4 .....   | B-3  |
| Figura B.9  | Resultados de concentrações de DBO nas leiras da Fase 1 .....   | B-3  |
| Figura B.10 | Resultados de concentrações de DBO nas leiras da Fase 2 .....   | B-4  |
| Figura B.11 | Resultados de concentrações de DBO nas leiras da Fase 3 .....   | B-4  |
| Figura B.12 | Resultados de concentrações de DBO nas leiras da Fase 4 .....   | B-4  |
| Figura B.13 | Resultados de concentrações de NTK nas leiras da Fase 1 .....   | B-5  |
| Figura B.14 | Resultados de concentrações de NTK nas leiras da Fase 2 .....   | B-5  |
| Figura B.15 | Resultados de concentrações de NTK nas leiras da Fase 3 .....   | B-5  |
| Figura B.16 | Resultados de concentrações de NTK nas leiras da Fase 4 .....   | B-6  |
| Figura B.17 | Resultados de concentrações de Pb nas leiras da Fase 1 .....  | B-6  |
| Figura B.18 | Resultados de concentrações de Pb nas leiras da Fase 2 .....  | B-6  |
| Figura B.19 | Resultados de concentrações de Pb nas leiras da Fase 3 .....  | B-7  |
| Figura B.20 | Resultados de concentrações de Pb nas leiras da Fase 4 .....  | B-7  |
| Figura B.21 | Resultados de concentrações de Ni nas leiras da Fase 1 .....  | B-7  |
| Figura B.22 | Resultados de concentrações de Ni nas leiras da Fase 2 .....  | B-8  |
| Figura B.23 | Resultados de concentrações de Ni nas leiras da Fase 3 .....  | B-8  |
| Figura B.24 | Resultados de concentrações de Ni nas leiras da Fase 4 .....  | B-8  |
| Figura B.25 | Resultados de concentrações de Cd nas leiras da Fase 1 .....  | B-9  |
| Figura B.26 | Resultados de concentrações de Cd nas leiras da Fase 2 .....  | B-9  |
| Figura B.27 | Resultados de concentrações de Cd nas leiras da Fase 3 .....  | B-9  |
| Figura B.28 | Resultados de concentrações de Cd nas leiras da Fase 4 .....  | B-10 |

|             |  |      |
|-------------|--|------|
| Figura B.29 | Resultados de concentrações de Cr nas leiras da Fase 1 ..... | B-10 |
| Figura B.30 | Resultados de concentrações de Cr nas leiras da Fase 2 ..... | B-10 |
| Figura B.31 | Resultados de concentrações de Cr nas leiras da Fase 3 ..... | B-11 |
| Figura B.32 | Resultados de concentrações de Cr nas leiras da Fase 4 ..... | B-11 |

## LISTA DE SIGLAS

|          |   |
|----------|---|
| ABNT:    | Associação Brasileira de Normas Técnicas        |
| CETESB:  | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental |
| CNEN:    | Conselho Nacional de Energia Nuclear            |
| DMLU:    | Departamento Municipal de Limpeza Urbana        |
| EPA:     | Environmental Protection Agency                 |
| FINEP:   | Financiadora de Estudos e Projetos              |
| HELP:    | Hydrologic Evaluation of Landfill Performance   |
| IBGE:    | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| IPH:     | Instituto de Pesquisas Hidráulicas              |
| LIMPURB: | Empresa de Limpeza Urbana                       |
| NBR:     | Norma Técnica Brasileira                        |
| PROSAB:  | Programa de Pesquisas em Saneamento Básico      |
| SSMA:    | Secretaria Estadual da Saúde e do Meio Ambiente |
| UFRGS:   | Universidade Federal do Rio Grande do Sul       |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| °C:                            | graus Celcius  |
| $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ : | sulfato de alumínio                                  |
| atm:                           | atmosfera  |
| C/N:                           | relação carbono nitrogênio                           |
| CaO:                           | óxido de cálcio                                      |
| Cd:                            | cádmio   |
| $\text{CH}_4$ :                | gás metano   |
| Cl:                            | cloro  |
| cm:                            | centímetro   |
| $\text{CO}_2$ :                | dióxido de carbono                                   |
| Co-M:                          | coenzima M   |
| COT:                           | carbono orgânico total                               |
| Cr:                            | cromo  |
| Cu:                            | cobre  |
| $C_v$ :                        | coeficiente de variação                              |
| d:                             | dia  |
| DBO:                           | demanda bioquímica de oxigênio                       |
| DQO:                           | demanda química de oxigênio                          |
| DQO/L:                         | demanda química de oxigênio por litro                |
| fator B:                       | coenzima fator B                                     |
| $F_{240}$ :                    | coenzima $F_{240}$                                   |
| Fe:                            | ferro  |
| $\text{FeCl}_3$ :              | cloreto férrico                                      |
| $\text{FeSO}_4$ :              | sulfato ferroso                                      |
| g:                             | grama  |
| g DQO/d:                       | grama de DQO por dia                                 |
| g DQO/m <sup>3</sup> d:        | grama de DQO por metro cúbico dia                    |
| g/kg:                          | grama por quilograma                                 |
| g/m <sup>2</sup> :             | grama por metro quadrado                             |
| g SSV/g DQO:                   | grama de sólidos suspensos voláteis por grama de DQO |
| h:                             | hora   |

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| H <sub>2</sub> :                 | gás hidrogênio   |
| H <sub>2</sub> S:                | ácido sulfídrico   |
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> : | ácido sulfúrico  |
| ha:                              | hectare  |
| K:                               | potássio   |
| kg:                              | quilograma   |
| kg/m <sup>3</sup> .d:            | quilograma por metro cúbico dia                              |
| L:                               | litro  |
| L/m <sup>2</sup> .d:             | litro por metro quadrado por dia                             |
| L/m <sup>3</sup> .d:             | litro por metro cúbico por dia                               |
| L/s:                             | litro por segundo  |
| m:                               | metro  |
| m <sup>2</sup> :                 | metro quadrado   |
| m <sup>3</sup> :                 | metro cúbico   |
| m <sup>3</sup> /d:               | metro cúbico por dia   |
| mg:                              | miligrama  |
| Mg:                              | magnésio   |
| mg/kg:                           | miligrama por quilograma                                     |
| mg/L:                            | miligrama por litro  |
| mg/L.h:                          | miligrama por litro hora                                     |
| mg/sem:                          | miligrama por semana   |
| mg SSV/mg DQO:                   | miligrama de sólidos suspensos voláteis por miligrama de DQO |
| min:                             | minuto   |
| ml/d:                            | mililitro por dia  |
| mm:                              | milímetro  |
| Mn:                              | manganês   |
| mV:                              | miliVolts  |
| Na:                              | sódio  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> :   | íon amônio   |
| NH <sub>3</sub> :                | amônia livre   |
| Ni:                              | níquel   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> :   | nitrato  |
| N <sub>org</sub> :               | nitrogênio orgânico  |
| NTK:                             | nitrogênio total de Kjeldahl                                 |

|                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| P:                   | fósforo                     |
| Pb:                  | chumbo                      |
| pH:                  | potencial hidrogeniônico    |
| $\text{PO}_4^{-2}$ : | ânion bivalente fosfato     |
| psi:                 | libra por polegada quadrada |
| s:                   | desvio padrão               |
| $s^2$ :              | variância                   |
| $\text{SO}_4^{-2}$ : | ânion bivalente sulfato     |
| SST:                 | sólidos suspensos totais    |
| ST:                  | sólidos totais              |
| W:                   | Watt                        |
| Zn:                  | zinco                       |



## 1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos, ou de sobras, acompanha o homem desde a sua origem, sendo os resíduos produzidos pelo homem primitivo, principalmente pelo tipo e pela sua reduzida quantidade, rapidamente absorvidos pelo meio ambiente. Nos dias atuais, com a concentração do homem nos centros urbanos e o conseqüente aumento abissal nos volumes gerados, a introdução de resíduos sintéticos de difícil degradação e a mobilização e disseminação de elementos inorgânicos como os metais, o correto tratamento e destinação final dos resíduos sólidos urbanos tornou-se um dos principais problemas ambientais deste final de século.

No Brasil, ainda é caótico o quadro de gerenciamento de resíduos sólidos. Estima-se que apenas 70 % dos resíduos sólidos urbanos gerados são regularmente coletados e, destes, apenas 1 % passa por algum tipo de tratamento como a incineração ou a compostagem, com cerca de 75 % sendo dispostos, inadequadamente, na forma de lixões. Felizmente, cada vez mais tem aumentado a preocupação dos municípios com esta questão, resultando na implantação de grande número de projetos de redução e unidades de reutilização e reciclagem de resíduos, bem como de unidades de tratamento e destinação final como os aterros sanitários.

O tratamento adequado do lixiviado, líquido gerado pela passagem da água pela massa de resíduos em degradação anaeróbia no interior dos aterros, permanece um problema não resolvido definitivamente, dentro de padrões técnico-econômicos compatíveis com as características sócio-econômicas brasileiras.

As principais dificuldades relacionadas ao tratamento de lixiviados de aterros sanitários, estão na variabilidade da vazão e da composição. A primeira, em função dos índices pluviométricos locais e do tipo de cobertura utilizada; e a segunda, devido aos diferentes resíduos dispostos e, principalmente, às modificações nas concentrações dos poluentes encontrados nos lixiviados de aterros de distintas idades. As concentrações de metais, nitrogênio e de carga orgânica no lixiviado, por exemplo, se modificam substancialmente em lixiviados

de aterros jovens e de aterro velhos. Estas características tornam o lixiviado muito diferente, sob o enfoque do tratamento, dos esgotos domésticos ou industriais.

O município de Porto Alegre vem implantando soluções inovadoras e conscientes no gerenciamento de resíduos sólidos, sendo hoje referência nacional nesta área. Além da coleta seletiva, a remediação de antigos lixões e a implantação de modernos aterros sanitários, testemunham esta política. No entanto, o tratamento adequado do lixiviado continua sendo um problema em aberto, principalmente em termos de alternativas de pós-tratamento ao tratamento anaeróbico ao qual são submetidos os lixiviados, em sistemas instalados nos próprios aterros.

Trabalhos recentes têm demonstrado que a vermicompostagem pode ser uma alternativa viável de tratamento de resíduos sólidos de diferentes origens, inclusive resíduos industriais perigosos ou de difícil decomposição, desde que condições ambientais mínimas exigidas pelas minhocas sejam garantidas.

Na busca de alternativas de baixo custo, aplicáveis à realidade brasileira, para tratamento de lixiviados de aterros sanitários velhos, ou de lixiviados que já tenham passado por algum tratamento anaeróbico anterior, é que este trabalho foi proposto e executado. Para tanto, utilizou-se leiras de vermicompostagem com composto e uma mistura de composto com estrume bovino curado como substratos orgânicos. O lixiviado utilizado na pesquisa, com características de lixiviado velho, foi oriundo do Aterro Sanitário Zona Norte, operado pelo DMLU de Porto Alegre.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho foi estudar a eficácia do húmus proveniente do processo de vermicompostagem de resíduos sólidos urbanos, na atenuação e remoção das cargas tóxicas de lixiviados de aterros sanitários.

Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos de pesquisa:

- verificação da eficiência da vermicompostagem, e do húmus, na remoção/atenuação de cargas tóxicas do lixiviado, principalmente nitrogênio amoniacal, ácidos voláteis e metais pesados;
- estudo de taxas de aplicação de lixiviado diferenciadas sobre o húmus, de forma a verificar a manutenção e/ou perda de eficiência do processo;
- avaliação do desempenho de diferentes tipos de substratos sólidos, composto de resíduos sólidos e uma mistura de composto e estrume bovino;
- avaliação da utilização de leiras mais profundas, com insuflamento mecânico de ar pela base;
- avaliação das disponibilidades de macro e micronutrientes no âmbito das leiras em estudo, antes e após o processamento;
- comprovação das taxas de vermes ideais para o processamento dos substratos testados.

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1. O problema crescente dos resíduos sólidos

A questão do manejo dos resíduos sólidos tem acompanhado o homem desde a sua origem. É, no entanto, nas últimas décadas que este problema tem se exacerbado. O homem primitivo, embora em menor quantidade, também gerava resíduos, como cinzas de fogueiras, restos de alimentos e utensílios ou ferramentas não mais utilizáveis. Como a produção era pequena, estes resíduos eram facilmente absorvidos pelo meio ambiente, retornando ao ciclo natural da matéria.

Com o desenvolvimento da raça humana, e sua conseqüente concentração em centros urbanos, ocorreu um brutal aumento na geração de resíduos, que continuam sendo dispostos no solo, porém agora em quantidades muito superiores à capacidade da natureza de absorvê-los, ou seja, a velocidade de produção de resíduos é maior que a velocidade de degradação natural.

Aliados a esta diferença nos gradientes de produção e de degradação, também a incorporação de materiais sintéticos dificilmente degradáveis, a mobilização e disseminação de elementos inorgânicos como os metais, e o modelo de consumo existente, baseado em produtos descartáveis, contribuem para a degradação da qualidade ambiental.

A produção *per capita* de resíduos sólidos tem crescido ano a ano; e depois de 35.000 anos (*Homo sapiens-sapiens* – homem que sabe que sabe), a humanidade lida com seus resíduos como naqueles idos tempos: reutiliza-os, aterra-os ou os queima (BREEN, 1991). Recentemente, vem tomando forma a idéia de diminuição da geração de resíduos. O gerenciamento integrado de resíduos sólidos é um conceito reconhecido que combina várias técnicas para o manejo dos distintos elementos do fluxo de resíduos.

EPA (1989) estabeleceu a seguinte hierarquia para o manejo de resíduo sólidos:

- redução na origem;
- reciclagem;
- tratamento;
- disposição final.

Todos estes componentes de um sistema de gerenciamento integrado são complementares uns em relação aos outros na preparação de um plano estratégico (BRIDGES e CURRAN, 1994). Este modelo tem sido utilizado no mundo inteiro, como ferramenta para solucionar os problemas decorrentes das quantidades crescentes de resíduos sólidos gerados. No Brasil, este tipo de gerenciamento iniciou-se no início dos anos 90, com implantação em municípios como Porto Alegre, RS, (REICHERT *et al.*, 1993; DUTRA e BALLESTRIN, 1997) e Belo Horizonte, MG, (CAMPOS e ABREU, 1995).

Qualquer que seja o modelo de gerenciamento adotado, a disposição no solo sempre será uma etapa essencial constituinte, como forma de disposição final. Estes sítios de disposição podem causar diversos danos ao homem e ao meio ambiente, principalmente se esta disposição no solo se der de maneira inadequada, a céu aberto, sítios estes normalmente chamados de lixões, que poluem o solo, a água e o ar. A maior parte destes impactos negativos podem e devem ser minimizados pela disposição correta, através da técnica de aterro sanitário.

Nos aterros de resíduos, os líquidos lixiviados, devido às águas pluviais que infiltram e percolam pela massa, carregam substâncias orgânicas e inorgânicas presentes nos resíduos e/ou resultantes da sua degradação biológica.

Quando este lixiviado chega aos mananciais hídricos superficiais ou subterrâneos, promove redução no oxigênio dissolvido, aumento na concentração de metais pesados, gosto, cor e odores indesejáveis, bem como promove condições ambientais para o desenvolvimento de microrganismos patogênicos (LIMA, 1995). Julga-se que o autor quis se referir à sobrevivência de microrganismos patogênicos, e não ao seu desenvolvimento.

## **3.2. Caracterização dos resíduos sólidos**

### **3.2.1. Classificação**

A heterogeneidade encontrada entre os resíduos sólidos urbanos é imensa. Estes variam em função das características da cidade e com as mudanças climáticas e sazonais.

Variam também com as alterações que ocorrem com a população que os produz, ou seja, os resíduos diferem de composição em razão dos hábitos e padrões de vida da comunidade. Mudanças na política econômica de um país também são causas para uma variação na massa de resíduos de determinada população.

Em função desta variabilidade, várias classificações têm sido propostas. Sob o ponto de vista da incineração, por exemplo, pode-se dividir os resíduos em combustíveis e incombustíveis.

Levando em conta os diferentes graus de biodegradabilidade, BOWERMAN apud LIMA (1986), sugere a seguinte classificação:

- facilmente degradável: matéria orgânica putrescível;
- moderadamente degradável: papel, papelão e outros produtos celulósicos;
- dificilmente degradável: trapo, couro, borracha e madeira;
- não-degradável: vidro, metal, plástico, pedra e terra.

A ABNT (1987) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, dividindo-os em três classes: Classe I, ou resíduos perigosos; Classe II, ou resíduos não-inertes; e Classe III, resíduos inertes.

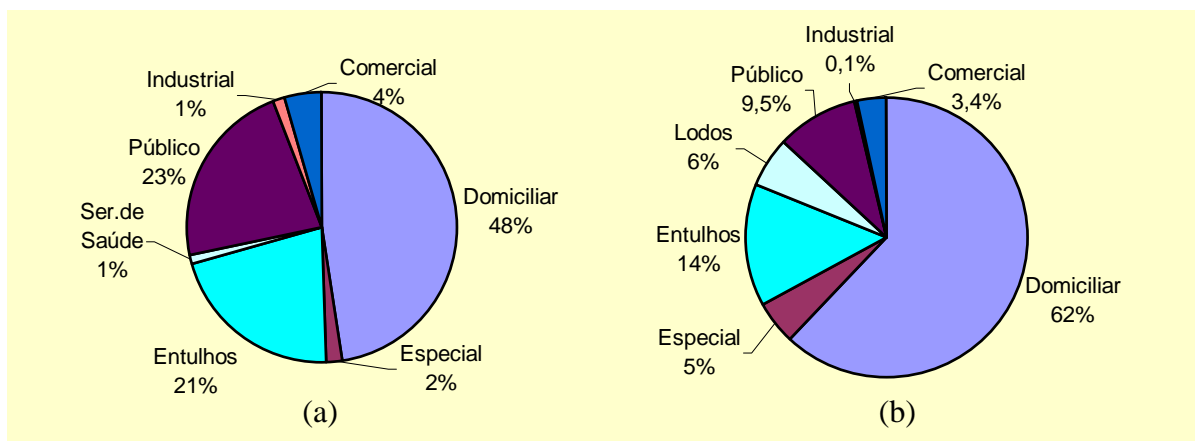
A classificação usualmente mais adotada é a que identifica o resíduo em função de sua origem, conforme apresentado abaixo, adaptado de PESSIN *et al.* (1991) e GOMES (1989):

- resíduo residencial: é o denominado resíduo domiciliar, constituído de restos de alimentos, invólucros diversos, varreduras, folhagens, ciscos e outros materiais descartados pela população diariamente;
- resíduo comercial: é proveniente de diversos estabelecimentos comerciais, como escritórios, lojas, hotéis, restaurantes, supermercados, quitandas e outros. É formado principalmente por papéis, papelão, plásticos, caixas, restos de lavagem, etc.;
- resíduo industrial: proveniente de diferentes áreas do setor industrial, e portanto, de constituição muito variada; é a principal fonte de resíduos perigosos;
- resíduo de serviços de saúde: é constituído de resíduos das mais diversas áreas dos estabelecimentos hospitalares, tais como refeitório e cozinha, administração, limpeza, centro cirúrgico e outros. Inserem-se aí também os resíduos provenientes de outros estabelecimentos prestadores de serviços de saú-

de, como farmácias, postos de saúde, clínicas médicas e veterinárias;

- resíduo público: proveniente da varrição regular das ruas, parques e praças, podas de árvores, conservação e limpeza de centros comerciais, feiras, constituindo-se basicamente de papéis, tocos de cigarros, invólucros, restos de capina, areia, ciscos e folhas;
- resíduo especial: é constituído por resíduos e materiais produzidos esporadicamente, como animais mortos, móveis e utensílios domésticos volumosos e entulhos;
- resíduo radioativo: material radioativo, principalmente de hospitais, cujo gerenciamento está ao encargo do Conselho Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Finalmente, outra classificação divide os resíduos sólidos em dois grandes grupos, com base no local de produção: os resíduos gerados em aglomerados urbanos e suas periferias são ditos como urbanos; já os resíduos gerados no “campo”, nas atividades da agricultura por exemplo, são classificados como resíduos rurais.



**Figura 3.1** – Classificação dos resíduos sólidos urbanos, conforme sua origem, percentagem em peso

(a) Município de Porto Alegre, 1997 (Fonte: DMLU, 1997)

(b) Dados médios dos Estados Unidos, 1990 (Fonte: TCHOBANOGLOUS *et al.*, 1993)

Os resíduos sólidos urbanos, excetuando-se os industriais perigosos, são classificados como resíduos Classe II e Classe III, sendo que os resíduos domiciliares são Classe II.

### 3.2.2. Composição

Composição é o termo utilizado para descrever os componentes individuais que formam uma determinada massa de resíduos, geralmente expressa em percentagem de peso. Informações sobre a composição dos resíduos sólidos são importantes para avaliar as necessidades de equipamentos, sistemas, e planos e programas de gerenciamento (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Além disso, a quantidade de matéria orgânica presente influencia diretamente a produção de biogás e a composição e a concentração dos líquidos lixiviados em aterros sanitários. Quanto maior a percentagem de matéria orgânica, maior o potencial de produção de metano e mais concentrado será o lixiviado.

Como característica marcante dos resíduos sólidos brasileiros, tem-se altas percentagens de matéria orgânica putrescível, acima de 50 % em peso, ao contrário dos países economicamente mais desenvolvidos, onde esta parcela é inferior a metade deste valor, como pode ser verificado na tabela 3.1.

**Tabela 3.1** – Composição física de resíduos sólidos domiciliares de algumas cidades brasileiras, dos Estados Unidos e do Japão

| Componente                   | Porcentagem em peso (%)                 |                                       |  |                                   |                                     |
|------------------------------|---|---------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------------------------------|
|                              | Porto Alegre, RS<br>(1994) <sup>a</sup> | São Carlos, SP<br>(1989) <sup>b</sup> | Caxias do Sul, RS<br>(1991) <sup>c</sup> | Davis, EUA<br>(1990) <sup>d</sup> | Osaka, Japão<br>(1989) <sup>e</sup> |
| Matéria orgânica putrescível | 58,6                                    | 56,7                                  | 53,4                                     | 6,4                               | 11,7                                |
| Papel e papelão              | 21,3                                    | 21,3                                  | 21,0                                     | 41,0                              | 35,7                                |
| Plástico                     | 8,4                                     | 8,5                                   | 8,9                                      | 10,7                              | 20,3                                |
| Vidro                        | 1,3                                     | 1,4                                   | 2,6                                      | 5,8                               | 7,1                                 |
| Metais                       | 4,4                                     | 5,4                                   | 5,4                                      | 7,9                               | 5,3                                 |
| Outros                       | 6,0                                     | 6,7                                   | 8,7                                      | 28,2                              | 19,9                                |

Fonte: <sup>a</sup> DMLU (1994); <sup>b</sup> GOMES (1989); <sup>c</sup> PESSIN *et al.* (1991); <sup>d</sup> TCHOBANOGLIOUS *et al.* (1993); <sup>e</sup> YOSHIDA (1995)

### 3.3. O aterro sanitário

#### 3.3.1. Aspectos construtivos, de proteção e segurança ambiental

O aterramento ou disposição no solo é o método mais antigo de gerenciamento de resíduos sólidos. Ainda hoje, este é o método mais utilizado no mundo inteiro. Aproxima-



damente 80 % dos resíduos sólidos do mundo são dispostos no solo, e no continente africano esta quantidade é superior a 95 % (HOGLAND, 1995).

Mesmo nos países industrializados, até vinte anos atrás, esta disposição no solo era feita de maneira inadequada, sem os devidos controles sanitários e ambientais. No Brasil, esta forma de destinação ainda é a mais utilizada. Segundo o IBGE (1991), 76 % dos resíduos sólidos urbanos são dispostos em sítios a céu aberto, também denominados de lixões, e 13 % em aterros controlados. Apenas 10 % dos resíduos gerados têm disposição adequada na forma de aterro sanitário.

Os aterros sanitários modernos incorporam uma série de aspectos de projeto e operação de modo a conduzir a uma coexistência amigável com o meio ambiente. A disposição controlada de resíduos em um aterro sanitário, especialmente a cobertura diária, reduz drasticamente o número de roedores e insetos, reduz o risco a saúde pública, e melhora o aspecto estético-paisagístico dos sítios de disposição.

A ABNT (1985) estabelece alguns elementos mínimos que devem constar de um projeto de aterro sanitário. São eles: sistema de drenagem superficial; sistema de drenagem e remoção de lixiviados; sistema de tratamento de lixiviados; impermeabilização inferior e superior; sistema de drenagem de gases.

### **3.3.2. O ecossistema aterro sanitário**

#### **3.3.2.1. Degradação anaeróbia de compostos orgânicos**

Para GANDOLLA *et al.* (1995), o aterro sanitário é uma tentativa do homem de confinar seus resíduos numa área controlada, a fim de fixar e concentrar as substâncias perigosas. Mas, ao mesmo tempo em que é uma criação artificial do homem, um aterro sanitário para resíduos sólidos urbanos é também um sistema vivo, dentro do qual se desenvolvem processos biológicos, similares aos que se encontram em certos ecossistemas particulares, ricos em matéria orgânica e pobres em oxigênio, como os sedimentos, pântanos e solos saturados em água.

Digestão anaeróbia é definida por METCALF e EDDY (1991), como a decomposição de matéria orgânica na ausência de oxigênio molecular, com a conversão deste material

em metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Na digestão anaeróbia, a matéria orgânica complexa, na forma de glicídios, proteínas, lipídios, etc., é convertida em compostos simples.

As reações bioquímicas envolvidas geralmente são reações enzimáticas. Como se sabe, uma das características peculiares das proteínas é sua especificidade. Os compostos sobre os quais agem quimicamente são denominados de substratos. A equação simplificada pode ser expressa da seguinte forma (PELCZAR *et al.*, 1980):



A enzima é sempre liberada enquanto que o substrato é transformado no produto da reação, sendo esta outra característica essencial deste grupo de proteínas.

A utilização de compostos orgânicos por bactérias, exige que tais substâncias sejam inicialmente hidrolisadas no ambiente externo antes que elas possam aproveitá-las. Para este propósito é que as bactérias produzem enzimas localizadas na sua superfície (extra celulares) que interagem com o alimento disponível no meio.

As enzimas são também responsáveis pelo processo de transferência de hidrogênio das reações de oxidação. Os microrganismos anaeróbios produzem enzimas que preferem compostos de carbono, nitrogênio ou enxofre como aceptores finais de hidrogênio.

Em geral, as enzimas possuem diversas características que afetam diretamente sistemas de degradação da matéria orgânica: são inativadas pelo calor, dependem da temperatura, são sujeitas a efeitos de toxicidade e são específicas para cada função.

Quando os resíduos são depositados em aterro sanitário, a biodegradação que resulta na formação de metano não se inicia imediatamente. Um período que varia de meses até anos pode ser necessário para que sejam estabelecidas as condições de crescimento adequadas aos microrganismos específicos. As fases de decomposição anaeróbia de resíduos em aterros, propostas por pesquisadores, variam de três a seis ou mais, dependendo dos dados específicos utilizados e dos objetivos de cada estudo.

Trabalhos de REES (1980), REES e VINEY (1982) e LIMA (1985) apud LIMA (1986), revelaram um modelo de quatro estágios para expressar a metanogênese em aterro. Resumidamente, este modelo é assim explicado:

- **fase aeróbia:** após o aterramento dos resíduos os microrganismos aeróbios encontram-se habitando o meio. A temperatura do aterro situa-se entre 40 e 45 °C. A du-

ração desta fase varia com a quantidade de oxigênio disponível e com o número de microrganismos. Segundo REES (1980), a fase aeróbia dura entre 10 e 100 dias após o aterramento dos resíduos. GANDOLLA (1995) é mais explícito e indica o final desta fase em 15 dias de aterramento. A atividade dos microrganismos aeróbios resulta em produção de  $\text{CO}_2$ , água e no aumento da temperatura interna do aterro;

- **fase anaeróbia ácida:** com a diminuição do oxigênio, o meio passa a ser ocupado por microrganismos anaeróbios e anaeróbios facultativos. A glicose resultante da primeira fase, é agora metabolizada. O resultado deste processo é a formação de álcoois, ácidos e acetatos. Gases como o hidrogênio e o dióxido de carbono são liberados para a atmosfera do aterro. A temperatura nesta fase diminui um pouco, ficando na faixa de 37 a 40°C. Esta fase tem uma duração aproximada de 60 dias;
- **fase metanogênica instável:** com o equilíbrio na segunda fase, álcoois, ácidos e acetatos são agora decompostos por outro grupo de microrganismos (microrganismos hidrolíticos e fermentativos). Ocorre grande produção de acetatos, formiatos, hidrogênio e  $\text{CO}_2$ , e pequenas quantidades de metano. A temperatura permanece em torno de 37°C. Em aterros, que são considerados como meios heterogêneos, dificilmente existem as condições ideais, fato que aumenta o tempo de retenção, fazendo com que a fase metanogênica instável possa durar até 8 anos, ou mais;
- **fase metanogênica estável:** finalmente, com a transformação dos acetatos, formiatos e dióxido de carbono produzidos na terceira fase por microrganismos metanogênicos, o processo se completa. Nesta fase,  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  são produzidos em grandes quantidades. O biogás gerado tem uma composição de aproximadamente 40% de dióxido de carbono e 60% de metano. Um aterro, em regime natural, pode atingir a quarta fase 10 anos após o aterramento;

POHLAND e HARPER (1985) apud GOMES (1989), apresentam um outro modelo para representar a digestão anaeróbia em aterros sanitários, e dividem o processo em cinco fases, assim descritas resumidamente:

- **fase de ajuste inicial (I):** é a fase de disposição inicial dos resíduos e acúmulo preliminar da mistura. Ocorre uma sedimentação inicial e cada célula do aterro é fechada. Variações nos parâmetros ambientais são detectadas e refletem o início do processo de estabilização;

- **fase de transição (II)**: a capacidade de campo é superada, isto é, inicia-se a formação do chorume ou lixiviado. A estabilização microbiológica sofre uma etapa de transição: passa de uma fase aeróbia para uma anaeróbia. Nitratos e sulfatos passam a ser, no lugar do oxigênio, os aceptores primários de elétrons. Surge dióxido de carbono no biogás formado no processo. O meio começa a se tornar redutor. Em análises do lixiviado já se encontram ácidos orgânicos voláteis;
- **fase de formação de ácidos (III)**: ácidos orgânicos voláteis intermediários tornam-se predominantes com a continuidade da hidrólise e fermentação dos resíduos e constituintes do percolado. Nutrientes como o nitrogênio e o fósforo são liberados e utilizados como substrato para o aumento da biomassa. O hidrogênio é detectado e sua presença afeta a natureza e o tipo de produtos intermediários em formação;
- **fase de fermentação do metano (IV)**: produtos intermediários que aparecem durante a fase de formação de ácidos, são convertidos em metano e excesso de CO<sub>2</sub>. Potenciais de oxi-redução atingem os menores valores e os nutrientes continuam sendo consumidos. A carga orgânica do percolado é bastante diminuída, em correspondência aos aumentos da produção de biogás;
- **fase de maturação final (V)**: estabilização da atividade biológica e os nutrientes começam a ser limitantes no processo. As condições naturais ambientais se restabelecem, assim como a produção do biogás quase cessa. O oxigênio e as espécies oxidadas podem reaparecer lentamente com o correspondente aumento do potencial redox.

As fases metabólicas simplificadas e os grupos microbianos envolvidos no processo de transformação anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos em bioestabilizados, em aterros sanitários, com geração de metano, são apresentados na figura 3.2.

### 3.3.2.2. Microbiologia da degradação anaeróbia

Segundo NOVAES (1986), participam do processo de digestão as seguintes bactérias com suas respectivas funções:

- **bactérias fermentativas**: exercem importante papel nos dois estágios iniciais da digestão anaeróbia. São responsáveis pela produção de enzimas que liberadas no meio,

hidrolisam compostos de cadeia complexa (como celulose, hemicelulose, pectina, etc.) e os transformam em compostos moleculares de cadeia simples. Estes últimos são fermentados resultando numa variedade de produtos como etanol, butiratos, acetatos, propionatos, etc. O substrato inicial e as condições do meio são fatores que regem os produtos do metabolismo desse grupo.

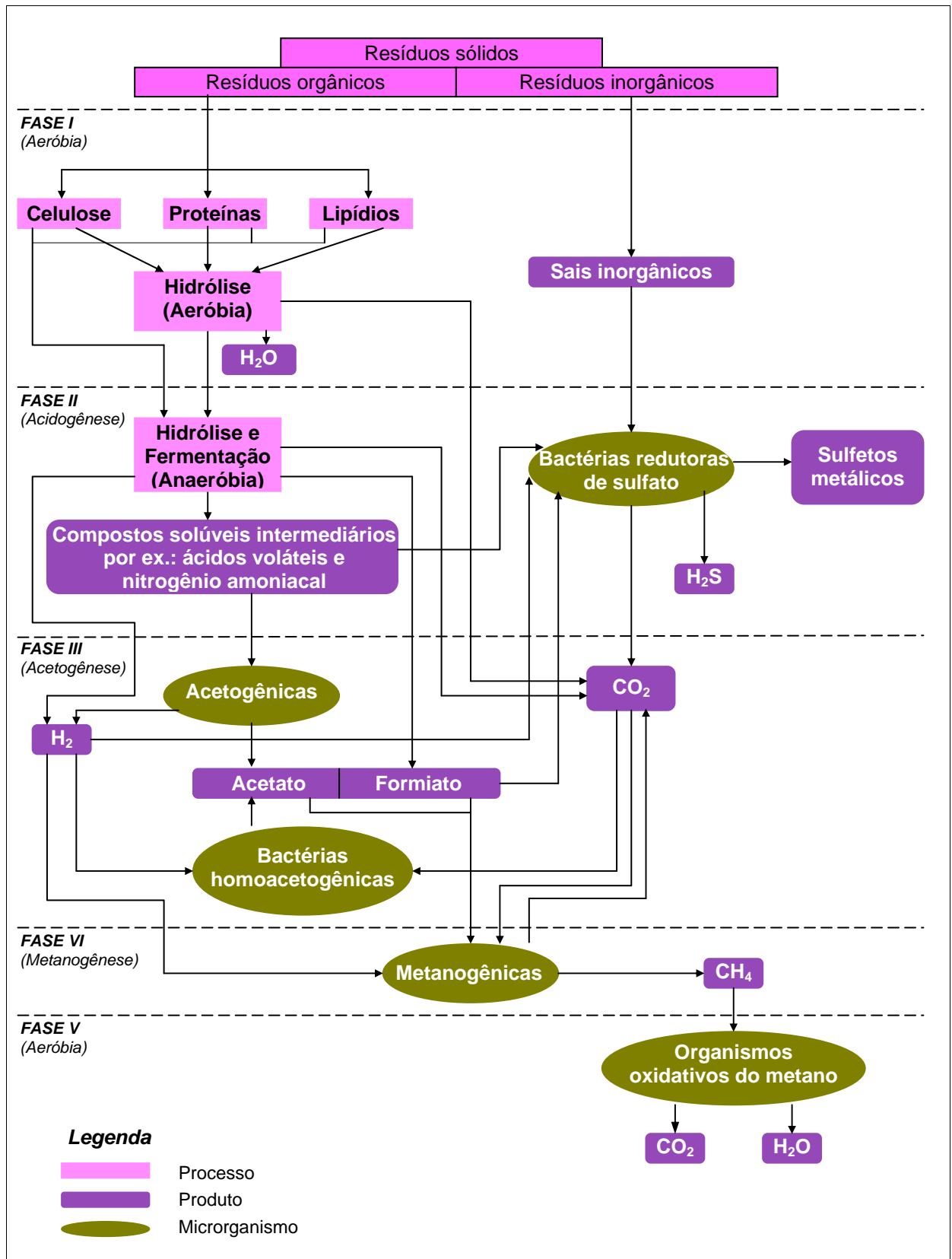
A maioria dos estudos desenvolvidos mostra a predominância de organismos da família *Streptococcaceae* e *Enterobacteriaceae*, e dos gêneros *Bacteroides*, *Clostridium*, *Butyrivibrio*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium* e *Lactobacillus*;

• **bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio:** consideradas essenciais à degradação anaeróbia, fermentam ácidos voláteis de cadeia maior que a do metanol, transformando-os em hidrogênio e acetato. Poucas espécies deste grupo de microrganismos foram isoladas e portanto igualmente pouco se conhece sobre elas, principalmente no que diz respeito às necessidades nutritivas. Verificou-se entretanto, a influência exercida pelo  $H_2$ , revelando o estreito relacionamento existente entre as bactérias em questão e as correspondentes bactérias consumidoras de  $H_2$ . A consequência relevante desse fato é o balanceamento do  $H_2$  no meio ambiente desses microrganismos.

Algumas bactérias acetogênicas foram identificadas em trabalhos em que foram cultivadas juntamente com metanogênicas consumidoras de  $H_2$ . *Desulfovibrio desulfuricans* e *Desulfovibrio crilgaris* produziram acetato,  $CO_2$ , e  $H_2$ , a partir de lactato na ausência de sulfato, e na presença de *Methano sarcina barkeri*, que utiliza acetato e  $H_2$  na metanogênese. *Syntrophobacter wolinii*, um organismo acetogênico, foi cultivado com *Desulfovibrio sp* (consumidor de  $H_2$ ), produzindo acetato e, provavelmente  $H_2$  e  $CO_2$  a partir do propionato.

A verificação da degradação de butirato por acetogênicas foi efetuado através do isolamento de *Syntrophomonas wolfer*, de rúmen bovino, cultivada com *Desulfovibrio sp* ou com *Methanospirillum hungatei*;

• **bactérias acetogênicas consumidoras de  $H_2$  ou homoacetogênicas:** fermentam um amplo espectro de compostos de um carbono e ácido acético, precursor do metano. Igualmente pouco se conhece a respeito desse grupo. O autor no entanto destaca que ZEIKUS, em 1981, descreveu o metabolismo dessas bactérias como de alta eficiência termodinâmica, como consequência da não formação de  $H_2$  e  $CO_2$  durante o crescimento de compostos orgânicos de cadeia longa.



**Figura 3.2** – Fases metabólicas e grupos microbianos envolvidos no processo de digestão anaeróbia (Fonte: HMSO, 1995)

A bactéria *Clostridium aceticum* foi identificada na conversão de H<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> a acetato. Bactérias homoacetogênicas que produzem acetato a partir do CO<sub>2</sub> foram identificadas como sendo a *Clostridium formiaceticum*, *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii* e *Eubacterium limosum*;

- **bactérias metanogênicas:** formam um grupo especial composto de várias espécies com diferentes formas celulares. Obtêm energia para o crescimento e formação do metano através de mecanismos ainda não inteiramente conhecidos. São estritamente anaeróbias e somente se utilizam de substratos específicos. No entanto, estudos comprovaram a sobrevivência de determinada espécie (*Methanotrix*) exposta a oxigênio puro, onde não só cresceram como igualmente produziram CH<sub>4</sub>. De um modo geral, desenvolvem-se em ambientes cujo potencial redox varia em torno de -300 mV. Considerou-se que o pH ideal para o seu crescimento e produção, situa-se numa faixa de 6,8 a 7,2, podendo contudo variar entre espécies. A temperatura situa-se na faixa de 15 a 40°C para bactérias mesófilas e de 55 a 65°C para as espécies termófilas. As necessidades nutricionais foram consideradas bastante simples, com o crescimento ocorrendo em presença de amônia, sulfetos ou cisteína como fontes respectivas de nitrogênio e enxofre.

YANG e OKOS (1987) citam mais as espécies metanogênicas *Methanosarcina mazei* e *Methanobacterium soehngenii* que usam o acetato como substrato.

Segundo FORESTI apud GOMES (1989), as principais características das bactérias metanogênicas são:

- apresentam grande variedade de forma;
- crescem em H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, formiato, acetato e metanol;
- necessitam de ambiente fortemente redutores, com valores de Eh variando entre -300 e -400 mV;
- utilizam NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (íon amônio) como única fonte de nitrogênio;
- utilizam cisteínas e sulfetos como fonte de enxofre;
- possuem algumas coenzimas específicas como F<sub>420</sub>, Co-M e fator B;
- não apresentam ácido murânico na parede celular;
- com relação a parede celular, apresentam estrutura lipídica peculiar;
- constitui-se, filogeneticamente, no grupo mais antigo entre os procariotes.

- **bactérias redutoras de sulfatos:** frequentemente associadas com as metanogênicas em meios anaeróbios, produzem acetato, H<sub>2</sub> e sulfetos que são utilizados pelas metanogênicas. Essa interação ainda permanece duvidosa e este grupo representa papel importante no processo, tendo em vista que podem agir tanto como bactérias acetogênicas favorecendo a metanogênese, ou como bactérias competitivas inibindo o processo, dependendo das concentrações do sulfato. Resumindo, são responsáveis tanto pela produção como pelo consumo de acetato.

### 3.3.3. Geração e caracterização do lixiviado

#### 3.3.3.1. Geração do lixiviado

Existe na literatura da língua portuguesa uma grande divergência acerca de qual nomenclatura é adequada para expressar e denominar o líquido que emana dos aterros sanitários. O termo na língua inglesa *leachate* é apresentado como sinônimo de *lixivate*, assim como o verbo *leach* é traduzido como lixiviar. No dicionário de termos técnicos de Saneamento Ambiental – CETESB (1985), *leachate* é traduzido como chorume de lixo, *leaching* como lixiviação e remoção de material solúvel pela passagem de água.

Na comunidade científica tem-se empregado vários termos para tradução de *leachate*: chorume, lixiviado, percolado, líquidos lixiviados e líquidos percolados. LUZ (1983) apud LIMA (1995) define chorume como o líquido proveniente de três fontes principais: umidade natural dos resíduos sólidos; água de constituição dos vários materiais, que sobra durante a decomposição; e líquido proveniente da dissolução de materiais orgânicos pelas enzimas expelidas pelas bactérias.

No entanto, os líquidos que chegam ao fundo do aterro provêm fundamentalmente de águas que infiltram nos locais de disposição, tanto águas da chuva como outras infiltrações. Em função disso, segundo GOMES (1995), muitos pesquisadores preferem os termos percolado ou líquidos percolados, elegendo o termo chorume apenas para denominar o resultado da atividade hidrolítica microbiana na degradação dos resíduos.

WU *et al.* (1988) descrevem o lixiviado como o produto derivado da hidrólise dos compostos orgânicos e da umidade do sistema, com características que variam em função do tipo de resíduos sólidos, da idade do aterro, das condições meteorológicas, geológicas e



hidrológicas do sítio de disposição. Em geral, o lixiviado possui elevada carga orgânica, fontes de nitrogênio, como a amônia, metais pesados e grupos microbianos.

Neste trabalho, optou-se pelo termo lixiviado, uma vez que, na prática, seria impossível distinguir as diferentes fontes de água dentro dos aterros sanitários. Além disso, o termo caracteriza melhor os processos físicos e químicos ligados ao fenômeno de geração deste líquido, como a infiltração e percolação das águas pluviais e o arraste, ou lixiviação, dos compostos solúveis do interior da massa de resíduos.

Entre os vários fatores que influenciam o volume de lixiviado gerado, destacam-se os seguintes:

- clima local (regime de precipitações pluviométricas, temperatura, velocidade e direção dos ventos, umidade relativa do ar);
- tipo de cobertura dos resíduos (material, espessura, periodicidade);
- umidade dos resíduos no momento do aterramento;
- grau de compactação dos resíduos;
- capacidade dos resíduos em reter umidade;
- infiltrações subterrâneas (no caso de não haver impermeabilização inferior).

Para estimar a vazão de lixiviado gerado, os métodos mais utilizados são os embasados no balanço hidrológico, existindo para tanto grande número de equações baseadas em múltiplos modelos analíticos para quantificar os processos hidrológicos envolvidos. Um exemplo de equação para balanço hídrico em aterros sanitários é apresentada abaixo (LU *et al.* (1985) apud SHARMA e LEWIS (1994)):

$$L = W_P + W_{SR} + W_{IR} + W_D + W_{GW} - R - E - \Delta S_S - \Delta S_R \quad (3-1)$$

onde:  $L$  = geração de lixiviado

$W_P$  = entrada devido à precipitação

$W_{SR}$  = entrada de água pluvial de fora do aterro

$W_{IR}$  = entrada de irrigação ou recirculação

$W_D$  = contribuição de água devido à decomposição dos resíduos

$W_{GW}$  = infiltração pela base

$R$  = escoamento superficial

$E$  = evapotranspiração

$\Delta S_S$  = variação da umidade armazenada no solo de cobertura

$\Delta S_R$  = variação da umidade armazenada nos resíduos sólidos

A equação 3-1 é uma das mais completas encontradas na literatura. Alguns dos parâmetros desta equação podem ser desprezíveis, como  $W_D$ , ou até mesmo iguais a zero, como  $W_{GW}$ , nos modernos aterros com impermeabilização inferior.

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos desenvolveu um modelo computacional com base no balanço hídrico chamado de Modelo Hidrológico de Avaliação da Performance de Aterros (HELP), que teve sua Versão 3 lançada em 1994, e é o modelo mais utilizado atualmente (PEYTON e SCHROEDER, 1993; SHARMA e LEWIS, 1994; FLEENOR e KING, 1995).

Em aterros menores e mais simples ou na falta de dados para aplicação dos modelos de balanço hídrico, metodologias simplificadas podem ser empregadas. Um delas é o Método Suíço, descrito por ROCCA *et al.* (1979), que estima a vazão de lixiviado de acordo com a seguinte expressão:

$$Q = \frac{1}{t} \cdot P \cdot A \cdot K \quad (3-2)$$

onde:  $Q$  = vazão média de lixiviado (l/s)

$P$  = precipitação média anual (mm)

$A$  = área do aterro (m<sup>2</sup>)

$t$  = número de segundos em um ano (s)

$K$  = coeficiente que depende do grau de compactação dos resíduos, com valores recomendados a partir da observação experimental.

### 3.3.3.2. Caracterização do lixiviado

A tabela 3.2 resume alguns resultados sobre a caracterização de lixiviados de aterros de resíduos sólidos urbanos.

Nesta tabela pode-se observar grandes variações nos resultados das análises do lixiviado proveniente de diferentes aterros. As razões estão relacionadas às características da população geradora dos resíduos (nível e características de vida sócio-econômico- culturais), topografia e geologia do local do tratamento e/ou destino final dos resíduos, formas de coleta dos resíduos, e ainda, às características hidrológicas e climáticas da região.

**Tabela 3.2** – Variabilidade das características físico-químicas do lixiviado de aterro sanitário

| Parâmetro <sup>a</sup>  | DMLU, 1998 <sup>1</sup> | GOMES, 1995 <sup>2</sup> | FUZARO, 1994 <sup>3</sup> | LIMPURB, 1994 <sup>4</sup> | MORAES e GOMES, 1993 <sup>5</sup> | DMLU, 1993 <sup>6</sup> |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| pH                      | 4,4 – 7,5               | 5,3 - 8,4                | 4,9 – 8,9                 | 5,5 – 8,6                  | 7,6 – 8,5                         | 6,0                     |
| Alcalinidade total      | 320 – 5.250             | 100 – 20.850             | –                         | 250 – 10.300               | –                                 | 10.140                  |
| DQO                     | 520 – 14.800            | 246 – 75.000             | 966 – 28.000              | 1.326 – 43.900             | 5.550 – 26.500                    | 61.700                  |
| DBO <sub>5</sub>        | 167 – 8.320             | 5,9 – 72.000             | 480 – 19.800              | –                          | 3.040 – 13.000                    | 200                     |
| Nitrogênio total        | –                       | 785 – 3.110              | –                         | –                          | –                                 | –                       |
| Nitrogênio amoniacal    | 18 – 823                | 0,2 – 2.090              | 6 – 3.100                 | –                          | 62 – 2.250                        | 700                     |
| Nitrogênio orgânico     | 3– 129                  | 2 – 2.150                | –                         | –                          | –                                 | 200                     |
| Nitrogênio de Kjeldhal  | 21 – 580                | –                        | 15 – 3.850                | –                          | 80 – 4.950                        | 1.070                   |
| Fosfato total           | 4,3 – 55,3              | 0 – 154                  | 3,7 – 72,5                | –                          | 0,5 – 44                          | 42                      |
| Cloreto                 | –                       | –                        | 50 – 11.000               | –                          | –                                 | –                       |
| Sulfato                 | –                       | –                        | 0 – 1.800                 | –                          | 2 – 9,5                           | –                       |
| Sólidos totais          | 2.019 – 11.033          | 10.700 – 48.080          | 3.100 – 26.300            | –                          | 6.100 – 19.500                    | 42.300                  |
| Sólidos totais fixos    | 621 – 4.628             | –                        | 270 – 15.100              | –                          | 2.100 – 11.090                    | 15.320                  |
| Sólidos totais voláteis | 3.346 – 4.338           | 2.580 – 29.665           | 248 – 15.400              | 1.116 – 8.320              | 3.560 – 8.410                     | 27.00                   |
| Sólidos em suspensão    | –                       | 40 – 6.550               | 32 – 10.600               | –                          | 300 – 1.190                       | –                       |
| Sólidos dissolvidos     | –                       | 2.000 – 15.830           | 511 – 24.500              | –                          | 630 – 1.990                       | –                       |
| Óleos e graxas          | 1 – 58                  | –                        | –                         | –                          | 23 – 472                          | –                       |
| Fenóis                  | 0,31 – 4,56             | –                        | –                         | –                          | 1,58 – 9,90                       | –                       |
| Cálcio                  | –                       | –                        | –                         | –                          | 1,48 – 140                        | –                       |
| Ferro                   | 11 – 190                | 0,09 – 5.500             | 0,2 – 6.000               | 4,0 – 19,0                 | 13,8 – 150                        | 140                     |
| Cobre                   | 0 – 0,04                | 0 – 9,9                  | <0,01 – 1,20              | –                          | 0,09 – 0,1                        | 0,044                   |
| Chumbo                  | 0 – 0,20                | 0 – 5                    | 0 – 2,30                  | <0,01 – 0,2                | 0,10 – 2,80                       | ND                      |
| Zinco                   | 0,11 – 7,8              | 0 – 1.344                | 0,12 – 35,6               | <0,01 – 0,68               | 0,07 – 8,0                        | –                       |
| Manganês                | 1,7 – 115               | 0,06 – 1.400             | 0,09 – 26,0               | –                          | –                                 | 20                      |
| Cádmio                  | 0 – 0,02                | 0,002 – 0,005            | 0 – 0,2                   | <0,001 – 0,36              | <0,0005 – 0,04                    | 0,018                   |
| Cromo                   | 0 – 0,41                | 0 – 4,28                 | 0 – 3,85                  | <0,01 – 0,13               | 0,08 – 0,38                       | 0,18                    |
| Merúrio                 | 0 – 0,002               | –                        | –                         | <0,01 – 0,01               | <0,0001 - <0,001                  | 0,001                   |
| Níquel                  | 0 – 0,11                | 0 1,2                    | –                         | <0,01 – 0,43               | 0,09 – 0,53                       | 0,18                    |

<sup>a</sup> Todas as unidades em mg/L, exceto pH (adimensional)

Fonte: <sup>1</sup> Aterro da Extrema, Porto Alegre, durante primeiro ano de operação (DMLU, 1998).

<sup>2</sup> Síntese dos valores de MANTELL, 1975; POHLAND apud PAVONI *et al.*, 1975; ROBINSON e MARIS, 1985; BOLDOCHI, 1990; SENIOR apud SCHALCH, 1992; SCHALCH, 1992; conforme apresentado por GOMES, 1995.

<sup>3</sup> Aterros Sanitários de Vila Albertina, Eng. Goulaert, Raposa Tavares e Pedreira CIT, São Paulo, em 1985, conforme apresentado por FUZARO, 1994.

<sup>4</sup> Bioremediação do Aterro Canabrava, Salvador. Dados de julho de 1992 a dezembro de 1993 (LIMPURB, 1994).

<sup>5</sup> Aterro Bandeirantes, São Paulo, cujas atividades iniciaram em 1979 (MORAES e GOMES, 1993).

<sup>6</sup> Aterro Três Meninas, Porto Alegre, após um ano de disposição de resíduos (DMLU, 1993).

A evolução dos processos biológicos que ocorrem no interior do aterro, bem como sua idade e a composição dos resíduos dispostos, influenciam nas características do lixiviado. GANDOLLA *et al.* (1995) apresentam os principais parâmetros utilizados na caracterização do lixiviado, descritos a seguir:

- o conteúdo em matéria orgânica, expressa em termos de DQO e DBO<sub>5</sub>, é inicialmente muito elevado, diminuindo depois em razão da degradação biológica e dos processos de lixiviação. Uma fração considerável de DBO inicial é constituída de ácidos graxos voláteis, cuja concentração é um bom indicador do estágio da degradação anaeróbia;
- o pH ácido no princípio, torna-se em seguida levemente alcalino;
- a relação DBO<sub>5</sub>/DQO, que indica o percentual da matéria orgânica que é facilmente biodegradável, e que diminui a medida que o aterro evolui. Inicialmente esta relação é de 0,5 a 0,8, passando a 0,07 a 0,08 após vários anos;
- a concentração de metais é elevada em aterros jovens, devido ao ambiente ácido que favorece a solubilização dos íons metálicos. Esta concentração tende a diminuir com o tempo, na medida em que o pH aumenta;
- o fósforo está presente em quantidades tão modestas que em certos casos há a necessidade de correção de sua concentração para viabilizar-se o tratamento biológico do lixiviado;
- o enxofre, que embora presente nos resíduos sólidos, só é emitido em quantidades pequenas, pois se fixa no aterro sob a forma de sulfetos insolúveis, principalmente de ferro;
- o nitrogênio está presente em nível significativo, encontra-se nas formas de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal, em concentrações mais elevadas em lixiviados de aterros jovens e velhos, respectivamente;
- os ácidos orgânicos voláteis, são identificadores do grau de degradabilidade e do andamento dos processos anaeróbios. Os principais ácidos voláteis encontrados em degradação anaeróbia são: acético, propiônico, butírico, isobutírico, valérico e iso-valérico. Com a idade do aterro um decréscimo de ácidos orgânicos voláteis e um incremento na proporção de ácidos fúlvicos tem sido reportada (LU *et al.*, 1984 apud QASIM e CHIANG, 1994).

Através da caracterização do lixiviado pode-se ainda dividir a degradação anaeróbia em três macro fases, as quais permitem determinar a idade do aterro em termos de degradação biológica:

- fase ácida: geração de ácidos graxos voláteis e alta carga orgânica (aterro jovem);
- fase metanogênica: geração do gás metano, pH levemente alcalino e níveis mais baixos nas concentrações do lixiviado (aterro velho);
- fase de maturação: as emissões diminuem até valores insignificantes (aterro estabilizado).

### **3.4. Tratabilidade e problemas relacionados ao lixiviado**

#### **3.4.1. Variabilidade da vazão e da composição**

Uma das maiores dificuldades relacionadas ao tratamento de lixiviados de aterros sanitários é a grande variação nos volumes gerados, bem como na sua composição. Os fatores que mais afetam a geração são os índices pluviométricos e o tipo de cobertura dos resíduos. Em função do tempo necessário para a percolação pela massa de resíduos, o hidrograma de vazões de lixiviados em determinada seção de controle sempre estará atrasado em relação ao pluviograma para determinado aterro.

A cobertura influencia as vazões na proporção direta em que permite a infiltração das águas pluviais. Três tipos de coberturas são normalmente utilizadas: solos argilosos compactados a baixos coeficientes de permeabilidade; geomembranas sintéticas; e a composição de solo compactado com geomembrana. Solo compactado é o tipo de cobertura para aterros sanitários que mais vem sendo utilizado, sendo a escolha mais barata, principalmente se existirem jazidas deste material próxima ao local do empreendimento. No entanto, nos países industrializados, principalmente nos Estados Unidos, a preferência na última década tem sido pelas geomembranas, muitas vezes em combinação com solo compactado (DANIEL, 1995).

LANDRETH (1995) descreve que os novos aterros nos Estados Unidos são projetados de modo a produzir o mínimo de lixiviado possível, concordando com o acima exposto. Estes aterros produzem lixiviado somente na fase de operação do aterro, sendo que a vazão tende a zero logo após o fechamento e a cobertura com geomembrana. Com isto, o tratamento

do lixiviado se dá somente na primeira fase. O autor chama este tipo de aterro de “aterro moderno”, em contrapartida aos aterros que continuam gerando lixiviado por vários anos, mesmo após o fechamento dos mesmos ou aqueles onde é feita a recirculação.

Embora esses “aterros modernos” dispensem a drenagem e o tratamento do lixiviado por um longo período de tempo, o inconveniente deste tipo de aterro é a degradação apenas parcial da matéria orgânica aterrada, uma vez que o processo de biodegradação se interromperá quando a umidade existente na massa de resíduos não for mais suficiente, uma vez que não será reposta naturalmente. Uma alternativa interessante, neste caso, é o fornecimento do líquido necessário a degradação através da recirculação do lixiviado.

Segundo MENDEZ *et al.* (1988) apud LEMA *et al.* (1988) a composição dos lixiviados está intimamente ligada à quantidade produzida, e varia tanto de aterro para aterro quanto sazonalmente. Os fatores que governam a composição do lixiviado incluem o tamanho das partículas, grau de compactação e composição dos resíduos sólidos, a hidrologia do local, o clima, e a idade da célula. Apesar da interação destes vários fatores resultar na variabilidade da composição do lixiviado, o fato de toda matéria orgânica dos resíduos sofrer degradação anaeróbia parcial ou total significa que todo lixiviado contém produtos intermediários deste processo, em conjunto com outros materiais solúveis.

Como forma de superar os problemas ocasionados pela inconstância da vazão e composição no momento da definição da forma de tratamento, é recomendável que se faça uma bacia de equalização anterior ao sistema de tratamento propriamente dito.

### **3.4.2. Influência da idade do aterro**

A esperada variação na qualidade do lixiviado com a idade do aterro, ou de uma determinada célula, deve-se ao fato de o processo de degradação ser contínuo. A liberação de constituintes do interior da massa de resíduos é governada pelos processos de degradação, e pela taxa e volume de água que infiltra pelo aterro. A idade do aterro é um meio conveniente de medir e monitorar as mudanças na composição do lixiviado e remoção de poluentes da massa, fato este que tem sido comprovado pela experiência do DMLU de Porto Alegre. Em função disso, muitos estudos descrevem a qualidade do lixiviado em função do tempo.

QASIM e CHIANG (1994) citam os estudos realizados por LU *et al.* (1984) revisando os dados de composição do lixiviado de mais de 30 investigações conduzidos por um período de 25 anos. A tendência geral reportada é de que a concentração de poluentes no lixiviado tem um pico nos primeiros 2 a 3 anos, apresentando um decaimento gradual nos anos seguintes. Esta tendência aplica-se a maioria dos constituintes, mas em particular aos indicadores orgânicos (DBO, DQO, COT, etc.), e poluição microbiológica. A maioria dos outros constituintes apresentou um decréscimo contínuo na sua concentração durante 3 a 5 anos, devido a contínua lixiviação dos resíduos. Dentre estes, estão o ferro, zinco, fosfato, cloreto, sódio, cobre, nitrogênio orgânico, sólidos totais, e sólidos suspensos. Em alguns casos, no entanto, houve flutuações na concentração de metais pesados devido aos mecanismos de precipitação, dissolução, adsorção e complexação que podem reter ou mobilizar os metais dentro do ambiente do aterro.

Várias classes de compostos orgânicos tem sido identificadas nos lixiviados de aterros. LU *et al.* (1984) apud QASIM e CHIANG (1994) fazem um revisão da literatura de compostos orgânicos em lixiviado. Esses pesquisadores classificam tais compostos nos seguintes grupos: ácidos orgânicos de baixo peso molecular; substâncias de peso molecular intermediário como carboidratos e ácidos húmicos e fúlvicos. A proporção relativa desses componentes é largamente afetada pela idade do aterro. Para aterros relativamente jovens, 90 por cento do carbono orgânico solúvel é devido aos ácidos orgânicos de cadeia curta. Dentre estes ácidos, o acético, propiônico, e butírico estão presentes nas maiores proporções. Com o avanço da idade do aterro esta proporção se altera, decaindo a concentração dos ácidos graxos e aumentando a fração de ácidos fúlvicos.

BORGES (1993), conduzindo um experimento em lisímetros e estudando a evolução qualitativa do lixiviado ao longo de 500 dias, conclui que neste período o grau de lixiviação dos sais minerais situou-se em 90 % do potencial lixiviável, e para as substâncias carbonáceas em 80 % do potencial extratível. O autor conclui também que 80 %, em média, dos elementos que formam a carga orgânica poluente do lixiviado são os ácidos graxos voláteis.

Uma compilação de dados para aterros de diferentes países e idades é apresentado nas tabelas 3.3 e 3.4. As figuras 3.3 e 3.4 mostram as mudanças nas concentrações de determinados parâmetros de gases e líquidos, respectivamente, durante as diferentes fases da degradação anaeróbia.

**Tabela 3.3** – Concentração de metais pesados em lixiviados de aterros de diferentes idades

| Local                  | Idade <sup>a</sup> | Zn        | Mn       | Ni       | Cr        | Cu        | Pb        | Cd   |
|------------------------|--------------------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Lisímetro <sup>b</sup> | J                  | 170,0     | 24,0     | 0,42     | 8,40      | 0,08      | 1,6       | 0,45 |
| Holanda                | J                  | 26,0      | –        | 0,43     | 0,32      | 0,30      | 0,12      | 0,02 |
| Inglaterra             | J                  | 21,5      | 26,5     | 0,57     | 0,56      | 0,12      | 0,40      | 0,03 |
| França                 | J                  | 34,2      | 38,5     | 6,11     | –         | 0,15      | 0,92      | –    |
| Canadá                 | J                  | 5,04      | –        | 1,08     | –         | 0,19      | –         | 0,10 |
| Espanha                | J                  | 0,53/1,4  | 4,8/7,6  | 0,3/0,5  | 0,13/0,57 | 0,08/0,19 | 0,05/0,45 | –    |
| Lisímetro <sup>c</sup> | M                  | 38,0      | 10,0     | 0,02     | 0,20      | 0,05      | 0,04      | 0,08 |
| Canadá                 | M                  | 0,22      | –        | 0,01     | –         | 0,11      | –         | 0,02 |
| Canadá                 | M                  | 0,18      | 3,24     | –        | 0,12      | 0,02      | 0,08      | 0,02 |
| Inglaterra             | V                  | 0,37      | 2,15     | 0,09     | 0,04      | 0,03      | 0,14      | 0,01 |
| Canadá                 | V                  | 0,19      | –        | –        | –         | 0,05      | –         | 0,01 |
| França                 | V                  | 0,22      | 0,45     | 0,18     | –         | 0,12      | 0,01      | –    |
| Espanha                | V                  | 0,24/0,56 | 0,05/0,4 | 0,47/0,5 | 0,17/0,23 | 0,1/0,14  | 0,07/0,17 | –    |

<sup>a</sup> **J**: jovem; **V**: velho; **M**: idade intermediária; (Os autores não definem explicitamente as idades consideradas)

<sup>b</sup> Lisímetro montado por CAMERON e KOCH (1980) apud LEMA *et al.* (1988)

<sup>c</sup> Lisímetro montado por POHLAND (1980) apud LEMA *et al.* (1988)

Todos os valores em mg/L

Fonte: Adaptado de LEMA *et al.* (1988)

O lixiviado de aterros velhos que se encontram na fase metanogênica é caracterizado por baixas concentrações de ácidos voláteis, pH neutro a alcalino, e níveis baixos de nitrogênio amoniacal e reduzida relação DBO/DQO.

**Tabela 3.4** – Concentração de ácidos orgânicos voláteis em lixiviados de aterros de diferentes idades

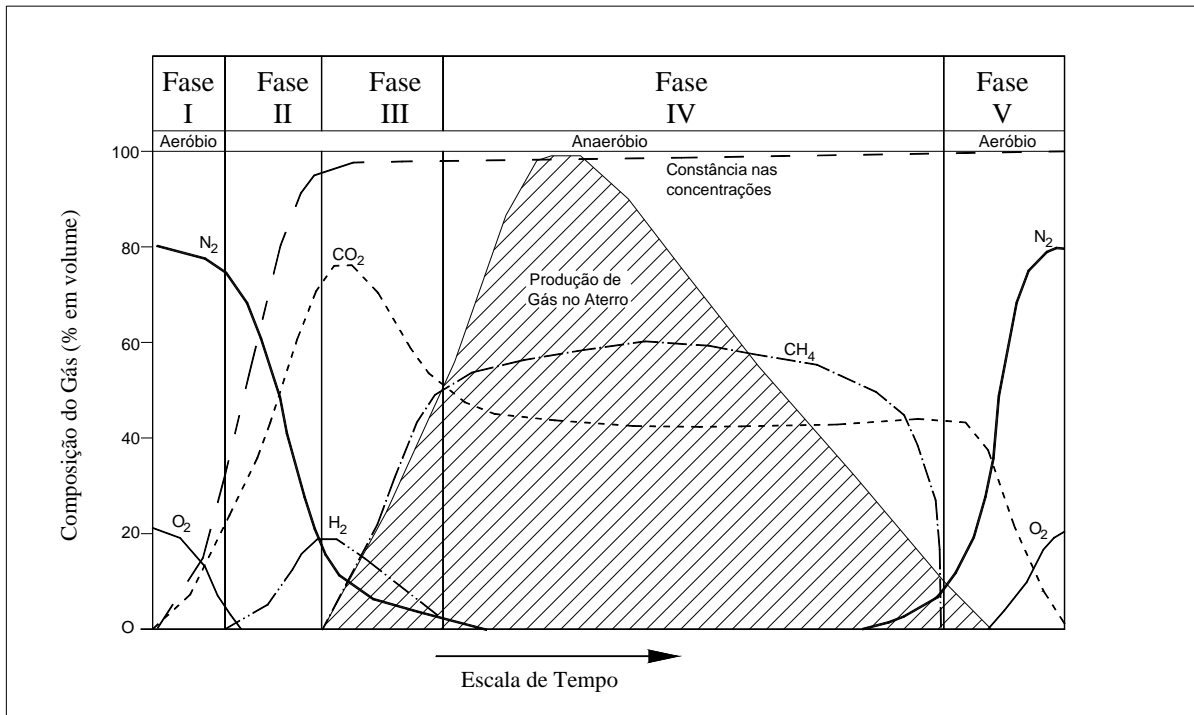
| Local      | Idade <sup>a</sup> | Acético | Propiônico | Butírico | Outros  |
|------------|--------------------|---------|------------|----------|---------|
| Holanda    | J                  | 4,5/6,8 | 2,2/3,4    | 3,6/5,1  | 1,2/1,6 |
| Inglaterra | J                  | 1,16    | 1,36       | 2,0      | 1,1     |
| Canadá     | J                  | 1,42    | 1,01       | 1,77     | 0,38    |
| França     | J                  | 8,5     | 5,25       | 6,13     | 5,75    |
| Espanha    | M                  | 3,5     | 0,91       | 1,81     | 2,5     |
| Canadá     | M                  | 0,56    | 0,19       | 0,19     | 0,08    |
| Inglaterra | V                  | 0,34    | 0,29       | 0,41     | 0,08    |

<sup>a</sup> **J**: jovem; **V**: velho; **M**: idade intermediária; (Os autores não definem explicitamente as idades consideradas)

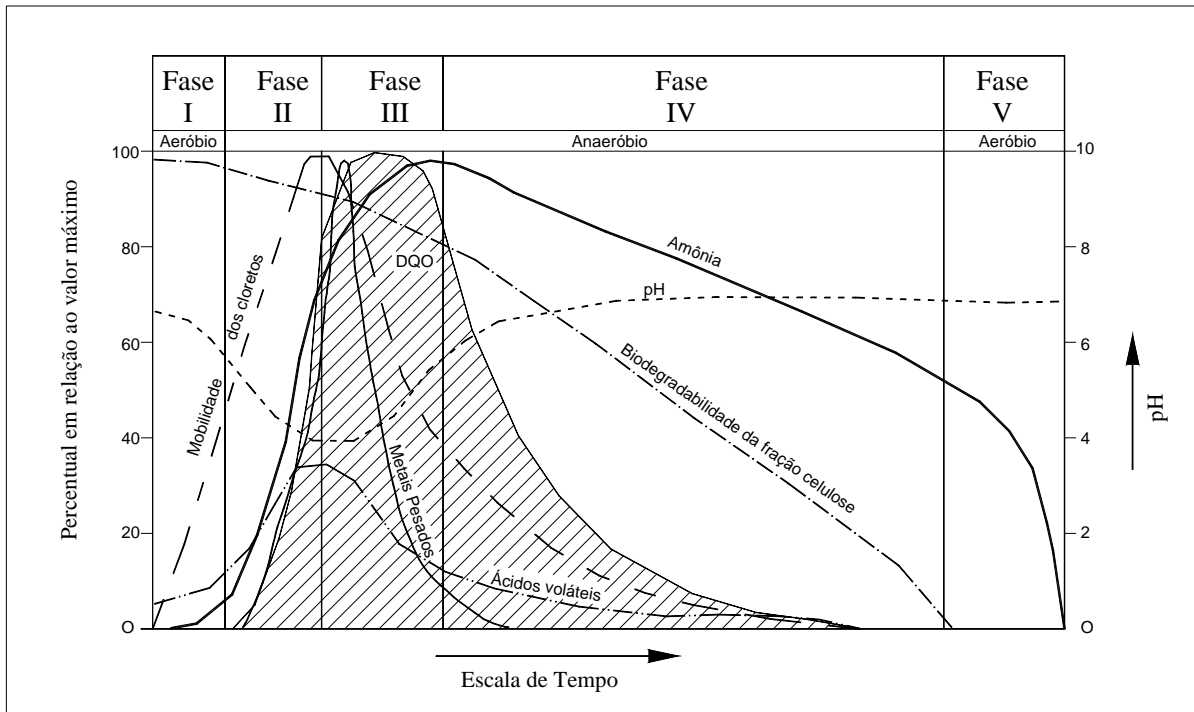
Todos os valores em mg/L

Fonte: Adaptado de LEMA *et al.* (1988)





**Figura 3.3**– Alterações na composição do biogás de aterros sanitários nas diferentes fases da degradação anaeróbia (Fonte: HMSO, 1995)



**Figura 3.4** – Alterações na composição do lixiviado de aterros sanitários nas diferentes fases da degradação anaeróbia (Fonte: HMSO, 1995)

### 3.4.3. Tratamentos aeróbios e anaeróbios do lixiviado

A grande maioria dos sistemas de tratamento biológico, tanto de águas residuárias quanto de lixiviado de aterros sanitários, usa o mecanismo aeróbio, distinguindo-se os sistemas com lodo em suspensão (lodos ativados, valo de oxidação, lagoa aerada) e com leito fixo (filtro biológico). No entanto, nos últimos anos vem ocorrendo um interesse crescente pela aplicação do tratamento anaeróbio para o tratamento de efluentes líquidos.

VAN HAANDEL e LETTINGA (1994) descrevem as diferenças fundamentais entre o metabolismo oxidativo (aeróbio) e a digestão anaeróbia, sob o enfoque da demanda de energia e produção de lodo. Do ponto de vista da demanda de energia, no caso da digestão anaeróbia há produção de energia útil na forma de metano. Os processos aeróbios requerem a presença de um oxidante de material orgânico. A maneira mais conveniente de se introduzir um oxidante é pela dissolução de oxigênio da atmosfera, usando-se a aeração mecânica, o que requer a demanda de energia. Traduzindo estas diferenças em termos de energia elétrica para a degradação de 110 g DQO/d, há um potencial de produção de energia útil (elétrica) de 4 W num processo anaeróbio de tratamento e uma demanda de 2 a 3,5 W em um sistema aeróbio. Portanto, do ponto de vista energético há uma vantagem muito clara para o uso de sistemas anaeróbios de tratamento.

Todos os sistemas biológicos de tratamento de efluentes produzem lodo em excesso, uma denominação para os sólidos que acumulam no sistema de tratamento e que devem ser descartados com uma determinada frequência. Segundo VAN HAANDEL e LETTINGA (1994) as diferenças nas produções de lodo estão relacionadas aos diferentes coeficientes de rendimento<sup>1</sup> (0,45g SSV/g DQO para processos aeróbios e 0,02 para os anaeróbios) e a razão de DQO e massa de material celular (SSV); por grama de microrganismos (massa de lodo bacteriano, medido como SSV) a DQO é de 1,48g. Assim, em sistemas aeróbios 67% da massa metabolizada é convertida em biomassa (crescimento de novas células) e apenas 33% é catabolizada (produção de CO<sub>2</sub>). No caso de digestão anaeróbia a proporção entre a massa catabolizada e a produção de biomassa é muito diferente dos valores acima. Como o coeficiente de rendimento é pequeno, a fração do material orgânico incorporada na massa celular também é pequena, 3%. Isto significa que uma fração muito grande do material digerido,

---

<sup>1</sup> Coeficiente de rendimento é a relação proporcional entre a massa celular sintetizada (medida em concentração de sólidos voláteis suspensos) e a massa de matéria orgânica metabolizada (medida em DQO).

97%, se transforma em metano pelo processo catabólico.

Como o custo da estabilização do lodo de excesso representa uma fração bastante significativa no custo operacional de sistemas de tratamento, cerca de 40 a 60 % em sistemas aeróbios (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994), a pequena produção de lodo de excesso da digestão anaeróbia é uma grande vantagem se comparada ao tratamento aeróbio.

Na tabela 3.5 são resumidas algumas vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios de tratamento em relação aos sistemas aeróbios.

**Tabela 3.5** – Vantagens e desvantagens dos processos anaeróbios

| <b>Vantagens</b>  | <b>Desvantagens</b>  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• baixa produção de sólidos</li> <li>• baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada</li> <li>• custos operacionais muito baixos</li> <li>• baixa demanda de área</li> <li>• baixos custos de implantação</li> <li>• produção de metano</li> <li>• possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses</li> <li>• tolerância a elevadas cargas orgânicas</li> <li>• aplicabilidade em pequena e grande escala</li> <li>• baixo consumo de nutrientes</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• as bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos</li> <li>• a partida do processo pode ser lenta na ausência de semente adaptada</li> <li>• alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária</li> <li>• a bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda precisam ser mais estudadas</li> <li>• possibilidade de geração de maus odores</li> <li>• possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável</li> <li>• remoção de nitrogênio, fósforo e patogênicos insatisfatória</li> </ul> |

Fonte: CHERNICHARO, 1997

Com base nos aspectos acima levantados, pode-se concluir que para o tratamento de lixiviados de aterros sanitários a associação de um sistema anaeróbio com outro aeróbio, nesta ordem, é uma solução atrativa do ponto de vista tecnológico e econômico. Como as concentrações de carga orgânica deste lixiviado são normalmente muito elevadas, um tratamento anaeróbio inicial é o mais indicado, necessitando de menores áreas para implantação do sistema e com conseqüente redução de custos. O gás metano gerado neste processo poderá ser utilizado no próprio sistema para elevação da temperatura nos meses de inverno, aumentando assim a eficiência. Outros fatores importantes são a menor taxa de produção de lodo na digestão anaeróbia e o tempo maior de preservação da biomassa mesmo sem alimentação do sistema, o que pode ser útil nos meses de verão, quando dependendo das condições locais específicas, a vazão de lixiviado gerado pode chegar a zero.

Para atender as condições ambientais e legais de emissão de efluentes, via de regra um tratamento aeróbio se faz necessário após o tratamento anaeróbio. Isto porque, para cargas orgânicas menores a degradação aeróbia é mais eficiente, e processos aeróbios como as lagoas de estabilização facultativas e de maturação podem ser usados para remoção adicional de DBO, remoção de nutrientes e remoção de patogênicos (VON SPERLING, 1996). Além de não remover a amônia, por exemplo, processos anaeróbios podem aumentar a concentração no efluente devido a degradação da matéria orgânica nitrogenada (WU *et al.*, 1988).

#### 3.4.4. Toxicidade e inibição

A adequada degradação dos efluentes orgânicos por qualquer processo biológico depende da manutenção de um ambiente favorável para os microrganismos, incluindo o controle ou a eliminação dos materiais tóxicos. Uma vez que qualquer composto quando presente em concentrações suficientemente elevadas pode ser tóxico, a toxicidade deve ser analisada em termos de níveis ao invés de materiais tóxicos. Neste aspecto, de acordo com SPEECE *et al.* (1996) apud CHERNICHARO (1997), as seguintes considerações devem ser feitas:

- quais as concentrações requeridas para causar a toxicidade?
- o efeito tóxico é reversível ou é bactericida?
- qual o potencial de aclimação dos microrganismos?

Metais pesados e resíduos não-metálicos, incluindo compostos orgânicos, podem ter efeito inibitório ou tóxico nos sistemas de tratamento, particularmente nos processos biológicos de tratamento. A tabela 3.6 apresenta uma lista de poluentes que tem efeito inibitório no processo aeróbio de lodos ativados.

A toxicidade tem sido considerada uma das principais razões da não utilização mais generalizada da digestão anaeróbia, uma vez que existe uma percepção difundida de que os processos anaeróbios não são capazes de tolerar a toxicidade. É verdade que as bactérias metanogênicas podem ser mais facilmente inibidas por toxinas; entretanto, os microrganismos usualmente possuem uma determinada capacidade de adaptação às concentrações inibidoras da maioria dos compostos.

Tanto o íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) quanto a amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) podem se tornar inibidores da digestão anaeróbia quando presentes em elevadas concentrações. Estas duas formas de amônia se apresentam em equilíbrio, com a concentração relativa de cada uma dependendo

do pH do meio, conforme a equação a seguir:



Concentrações de amônia livre acima de 150 mg/L são tóxicas às bactérias metanogênicas, enquanto que o limite máximo de segurança para o íon amônio é da ordem de 3.000 mg/L (CHERNICHARO, 1997). Uma das formas de reduzir a toxicidade da amônia é a manutenção do sistema em  $pH < 7,2$ , pois assim o equilíbrio da equação 3-3 se desloca para a esquerda, prevalecendo o íon amônio.

**Tabela 3.6** – Concentrações limite de poluentes que causam inibição em processos de lodos ativados

| Poluente          | Remoção Carbonácea | Nitrificação |
|-------------------|--------------------|--------------|
| Alumínio          | 15–26              | –            |
| Amônia            | 480                | –            |
| Arsênico          | 0,1                | –            |
| Borato (Boro)     | 0,05–100           | –            |
| Cádmio            | 10–100             | –            |
| Cálcio            | 2.500              | –            |
| Cromo hexavalente | 1–10               | 0,25         |
| Cromo trivalente  | 50                 | –            |
| Cobre             | 1,0                | 0,005–0,5    |
| Cianeto           | 0,1–5              | 0,34         |
| Ferro             | 1.000              | –            |
| Manganês          | 10                 | –            |
| Magnésio          | –                  | 59           |
| Mercurio          | 0,1–5,0            | –            |
| Níquel            | 1,0–2,5            | 0,25         |
| Prata             | 5                  | –            |
| Sulfato           | –                  | 500          |
| Zinco             | 0,8–10             | 0,08–0,5     |
| Fenol             | 200                | 4–10         |

Todos os valores em mg/L

Fonte: METCALF e EDDY (1991).

A concentração de ácidos voláteis se torna inibidora quando ocorre um desbalanceamento nas taxas de produção destes ácidos pelas bactérias acidogênicas e de consumo pelas bactérias acetogênicas, elevando assim o pH e inibindo as bactérias metanogênicas. Segundo MONTEGGIA (1996) concentrações de ácido butírico de até 6.000 mg/L não causam redução na atividade metanogênica; e a concentração de ácido propiônico pode causar toxicidade a partir de 1.500 mg/L. O autor afirma ainda que a toxicidade é causada pela fração não ionizada dos ácidos voláteis, a qual por sua vez é função do pH. Assim, no caso do ácido acético, ocorre toxicidade a partir de 5.500 mg/L e de 1.800 mg/L para pH de 7,0 e de 6,5, respectivamente.

Somente as frações solúveis dos metais pesados são tóxicas à digestão anaeró-

bia e, portanto, a precipitação destes metais na forma de sais de sulfeto, carbonatos ou hidróxidos, e complexação destes metais são maneiras de evitar a inibição do processo. Segundo SOUZA (1982) a presença de sulfetos solúveis nos sistema de digestão, ou de  $H_2S$  nos gases produzidos, invariavelmente indica a inexistência de concentrações tóxicas de metais pesados; com exceção para o cromo, que não forma sulfetos suficientemente insolúveis para que o mecanismo de precipitação seja eficiente na proteção das bactérias metanogênicas.

MOSEY e HUGHES (1975) observaram que os limites acima dos quais ocorreu inibição total do processo, por adição individual de cada metal separadamente, foram os seguintes: 163 mg/L para Zn; 180 mg/L para Cd; 170 mg/L para Cu; e 2.600 mg/L para Fe.

CAMERON e KOCH (1980) fizeram teste de toxicidade de lixiviados de aterros reais e de lisímetros e identificaram como fontes principais de toxicidade a amônia não ionizada, o tanino, o cobre e o íon hidrogênio. Concluíram que a toxicidade do lixiviado de aterros jovens é muito maior, ocorrendo um decaimento exponencial desta com o tempo.

### **3.5. Sistemas de tratamento de lixiviado**

#### **3.5.1. Introdução**

Os lixiviados de aterros sanitários, que inicialmente apresentam elevadas concentrações de poluentes, caracterizadas por elevadas DQO, DBO,  $NH_4^+$  e baixo pH, tem grande variabilidade em seus constituintes no tempo e no espaço, variando de aterro para aterro.

A determinação do melhor sistema de tratamento para os lixiviados não é uma tarefa simples, pois a princípio todas as operações e processos de tratamento de águas residuárias podem ser a eles aplicados; no entanto, as eficiências variam, processo a processo, de lixiviado para lixiviado. Importantes fatores direcionam a seleção do tratamento mais adequado: as características do lixiviado, a flutuação das vazões, a possibilidade de tratamento conjunto com efluentes domésticos, as variáveis ambientais, os custos e a disponibilidade de área para implantar a estação de tratamento, entre outros.

Resulta assim que o tratamento do lixiviado não deve ser abordado de uma maneira isolada, e sim fazendo parte de uma proposta de gerenciamento amplo do aterro sanitário – como uma das suas partes principais – onde, em função do rigor que se deseja no controle deste efluente, da estação de tratamento em si, dos limites de emissão e dos custos de

implantação e operação, poderão ser previstos dispositivos à retenção em bacias de detenção/equalização e recirculação de lixiviado para as células do aterro. Outro fator importante é que o sistema de tratamento deverá continuar funcionando por vários anos após o fechamento do aterro.

### **3.5.2. Métodos convencionais**

#### **3.5.2.1. Tratamento biológico**

O tratamento biológico – aeróbio e anaeróbio – de lixiviados, é baseado no contato do líquido com uma cultura de microrganismos que se desenvolvem ao usar a matéria orgânica dissolvida como fonte de alimento e energia. Os métodos utilizados para otimização do processo biológico incluem o controle dos níveis de oxigênio dissolvido, a adição de nutrientes, o aumento da concentração de microrganismos e a manutenção das condições ambientais ótimas, como pH, temperatura e mistura, entre outros.

QASIM e CHIANG (1994) citam alguns processos de tratamento que mais têm sido aplicados ao tratamento de lixiviados:

- lodos ativados;
- lagoas de estabilização;
- lagoas aeradas;
- discos rotativos (bio-discos);
- digestão anaeróbia.

#### ***Lodos ativados***

No processo de lodos ativados, microrganismos são misturados com o lixiviado e o crescimento microbiano se dá pela assimilação da matéria orgânica dissolvida (ou suspensa) presente no afluente. Os microrganismos crescem na presença de oxigênio dissolvido na água e fornecido mecanicamente, e são misturados por agitação mecânica. Neste processo há a formação de flocos ou colônias de microrganismos, o lodo ativado propriamente dito.

Este processo é composto geralmente por reator de mistura completa, câmara de aeração e clarificador secundário (decantador), para reter o lodo ativado que sai do reator

com o afluente tratado. O sistema de lodos ativados tem duas concepções básicas: fluxo contínuo e sistema de reatores sequenciais em batelada.

O sistema de fluxo contínuo consiste basicamente em um reator de mistura completa seguido de um decantador, com a recirculação de lodo através de bombeamento. Parte do lodo é descartada, o que permite o controle da biomassa ativa no reator. O sistema em batelada consiste em um único tanque que funciona ora como reator de mistura completa e ora como decantador, de acordo com a regra operativa imposta.

COOK e FOREE (1974), utilizando cinco sistemas de lodos ativados, em escala de bancada, com injeção de ar pelo fundo e usando lodo ativado já aclimatado com lixiviado, obtiveram os resultados constantes na tabela 3.7. Os coeficientes cinéticos usados no processo, obtidos em estudo preliminar com lixiviado de aterro sanitário, foram os seguintes:

- $y = 0,40 \text{ mg SSV/mg DQO}$
- $b = 0,05 \text{ d}^{-1}$
- $K = 0,60 \text{ mg DQO/d} \cdot \text{mg SSV}$
- $K_s = 175 \text{ mg DQO/L}$

**Tabela 3.7** – Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados

| Parâmetro                           | Lixiviado afluente | Efluente tratado |          |             |            |          |
|-------------------------------------|--------------------|------------------|----------|-------------|------------|----------|
|                                     |                    | Reator 1         | Reator 2 | Reator 3    | Reator 4   | Reator 5 |
| Adição no lixiviado                 | –                  | –                | L.A.     | L.A. + Nut. | Nutrientes | –        |
| Tempo de detenção hidráulica (d)    | –                  | 10               | 10       | 10          | 10         | 5        |
| Carga (g DQO/m <sup>3</sup> .d)     | –                  | 1.550            | 1.550    | 1.550       | 1.550      | 3.100    |
| DQO <sub>total</sub> (mg/L)         | 15.800             | 360              | 340      | 290         | 310        | 8.450    |
| Remoção de DQO <sub>total</sub> (%) | –                  | 97,6             | 97,8     | 98,1        | 98,0       | 46,5     |
| DBO <sub>5</sub> (mg/L)             | 7.100              | 26               | 23       | 11          | 10         | 3.400    |
| Remoção de DBO <sub>5</sub> (%)     | –                  | 99,6             | 99,7     | 99,8        | 99,9       | 52,1     |
| SS (mg/L)                           | 550                | 5.950            | 7.370    | 7.370       | 7.070      | 4.490    |
| SSV (mg/L)                          | 310                | 4.410            | 4.930    | 4.930       | 5.020      | 3.270    |
| Remoção de SSV (%)                  | 57,1               | 74,3             | 66,8     | 66,8        | 70,9       | 73,0     |
| Relação DBO <sub>5</sub> /DQO       | 0,45               | 0,072            | 0,067    | 0,067       | 0,032      | 0,402    |

Nota: L.A. = lodo ativado; Nut. = Nutrientes

Fonte: COOK e FOREE (1974).

BOYLE e HAM (1974) utilizaram três reatores aeróbios, em escala de bancada, para estudar o tratamento do lixiviado. Os reatores “A” e “D” operaram por vários meses, usando sempre cinco dias como tempo de detenção hidráulico; o reator “C” simulou um sistema de aeração prolongada, com ciclo de 23 h de aeração por uma hora de descanso. Para temperaturas entre 23 e 25 °C durante o estudo, obtiveram os resultados da tabela 3.8.

KEENAN *et al.* (1974), monitorando e operando uma estação completa de tra-



tamento de lixiviado, com tratamento biológico por lodos ativados em escala real, com recirculação de lodo, e físico-químico, obtiveram resultados muito significativos. A concentração de SSV variou de 6.000 a 12.000 mg/L e a relação alimento/microrganismos (F/M) variou de 0,12 a 0,32 dia<sup>-1</sup> para um tempo médio de detenção hidráulica de 6,6 h. Os principais parâmetros analisados são apresentados na tabela 3.9.

**Tabela 3.8** – Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados

| Parâmetro                           | Reator A      |               | Reator C | Reator D |
|-------------------------------------|---------------|---------------|----------|----------|
|                                     | Experimento 1 | Experimento 2 |          |          |
| Tempo de detenção hidráulica (d)    | 5             | 5             | 1        | 5        |
| DBO <sub>afluente</sub> (mg/L)      | 1.550         | 2.900         | 8.000    | 7.010    |
| Carga (g DBO/m <sup>3</sup> .d)     | 3.040         | 5.760         | 5.280    | 13.920   |
| DBO <sub>efluente</sub> (mg/L)      | 160           | 200           | 7.800    | 1.400    |
| Remoção de DBO (%)                  | 90            | 93            | 2,5      | 80       |
| DQO <sub>afluente</sub> (mg/L)      | 2.700         | 6.200         | 9.200    | 8.800    |
| Carga (g DQO/m <sup>3</sup> .d)     | 5.440         | 1.040         | 6.080    | 17.440   |
| DQO <sub>efluente</sub> (mg/L)      | 830           | 430           | 6.720    | 2.310    |
| Remoção de DQO (%)                  | 80            | 93            | 30       | 74       |
| Relação DBO/DQO <sub>afluente</sub> | 0,574         | 0,467         | 0,869    | 0,796    |
| Relação DBO/DQO <sub>efluente</sub> | 0,193         | 0,465         | 1,161    | 0,606    |

Fonte: BOYLE e HAM (1974).

**Tabela 3.9** – Resultados do tratamento de lixiviado por lodos ativados, em escala real

| Parâmetro                              | Operação em paralelo |             | Operação em série |             |
|--|----------------------|-------------|-------------------|-------------|
|  | Afluente             | Remoção (%) | Afluente          | Remoção (%) |
| Tempo de detenção hidráulica (d)       | 1,9                  | –           | 2,0               | –           |
| DQO (mg/L)                             | 18.488               | 94,9        | 18.505            | 94,6        |
| DBO (mg/L)                             | 12.468               | 99,1        | 8.143             | 94,3        |
| Relação DBO/DQO                        | 0,674                | –           | 0,440             | –           |
| Alcalinidade (mg CaCO <sub>3</sub> /l) | 5.479                | 87,5        | 5.262             | 71,6        |
| Sulfato (mg/L)                         | 645                  | –           | 178               | –           |
| Fosfato (mg/L)                         | 2,15                 | –           | 1,39              | –           |
| NTK (mg/L – N)                         | 748                  | 86,4        | –                 | –           |
| SS (mg/L)                              | 686                  | 97,4        | 1.655             | 71,1        |
| SD (mg/L)                              | 13.563               | 58,0        | 13.091            | 44,7        |
| Vazão (m <sup>3</sup> /d)              | 79,92                | –           | 38,04             | –           |

Fonte: KEENAN *et al.* (1984).

Realizando estudos com lixiviado de aterro sanitário em planta-piloto, RÜGER *et al.* (1996) obtiveram uma redução média de 52 % na DQO para um lixiviado com DQO afluente de 10.300 mg/L, usando o processo de lodos ativados. O tempo de detenção hidráulica não foi especificado. Seguido de um tratamento físico-químico (floculação/decantação), o sistema apresentou uma eficiência média de 80 % na remoção da DQO. A alternativa acima, foi proposta pelos autores para implantação no Aterro Bandeirantes em São Paulo, com uma

vazão de projeto de 10 L/s.

### ***Lagoas de Estabilização***

Lagoas de estabilização são bacias de grande volume e pequenas profundidades onde a ação do vento e a atividade fotossintética das algas promovem a aeração, e uma mistura de população microbiana autotrófica e eutotrófica decompõem a matéria orgânica ao longo de um grande tempo de detenção. A radiação solar ou intensidade luminosa é um fator ambiental muito importante, uma vez que regula a produção de oxigênio pelas algas. Em função da natureza da atividade biológica que nelas ocorre, as lagoas de estabilização são geralmente classificadas em aeróbia, facultativa e anaeróbia. Nas lagoas facultativas ocorre uma camada superior aeróbia, uma camada de fundo onde se desenvolvem processos anaeróbios, e uma camada intermediária com mecanismos aeróbio-anaeróbios.

Neste sistema geralmente são utilizadas uma ou mais lagoas de maturação no final do sistema, que funcionam como polimento, removendo patogênicos (VON SPERLING, 1996).

QASIN e CHIANG (1994) referem-se às lagoas de estabilização como sendo um método relativamente barato para tratamento de lixiviado, que pode ser utilizado antes de disposição para tratamento em ETEs (estações de tratamento de esgotos) ou recirculação dentro do aterro.

### ***Lagoas aeradas***

As lagoas aeradas são semelhantes às lagoas de estabilização, com a diferença de que são providas de equipamentos de aeração mecânica, cuja principal finalidade é introduzir oxigênio na massa líquida. Sua profundidade varia de 3 a 5 m. O sistema funciona como um tanque de aeração, no qual a aeração artificial substitui a oxigenação natural através das algas.

A área requerida por este sistema é menor do que a requerida pelas lagoas de estabilização, devido a sua maior profundidade e ao menor tempo de detenção necessário para a estabilização da matéria orgânica.

GARCIA *et al.* (1995) estudaram a utilização de lagoas aeradas para tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Foram monitoradas duas lagoas em escala de bancada, com o uso de produtos biotecnológicos com correção da concentração de nutrientes para o melhor desenvolvimento dos microrganismos. Os resultados demonstraram que não houve aumento significativo nas remoções de DQO e DBO, com o uso de três produtos biotecnológicos adequados ao tratamento de lixiviados e disponíveis no mercado brasileiro.

Nos testes realizados pelos autores com a adição simultânea de fósforo e produtos biotecnológicos ao aflente, observou-se um desempenho levemente superior para o tempo de detenção hidráulica de 25 dias, resultando em melhores eficiências de remoção de DQO e DBO em relação ao sistema controle. Por outro lado, no período com tempo de detenção igual a 15 dias, o desempenho do sistema com adição de produtos biotecnológicos foi inferior em ambas as situações. Percebe-se, pelo exposto acima, que a utilização destes produtos chamados de biotecnológicos em nada acrescenta ao tratamento de efluentes líquidos.

A suspensão da adição de produtos biotecnológicos realizada na fase com adição de fósforo, apenas para o período com tempo de detenção hidráulica de 15 dias, não levou o sistema que havia recebido adições a retomar o desempenho mais elevado em termos de remoção de DQO e DBO.

Durante períodos de pequena vazão de lixiviados, a relação DBO/NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pode cair significativamente, até valores de 1 a 5 g/g. Estes valores são muito menores que o limite requerido para uma eficiente remoção do íon amônio pela assimilação biológica, que varia de 20 a 28 g/g para os métodos de tratamento aeróbio como as lagoas aeradas (AKESSON e NILSSON, 1997).

### ***Discos rotativos (bio-discos)***

O sistema consiste de uma série de discos ligeiramente espaçados, montados em um eixo horizontal. Os discos giram vagarosamente em torno deste eixo e mantêm, a cada instante, cerca da metade da área superficial de cada disco imersa e a restante exposta ao ar. A medida que os discos giram, a parte exposta aera uma película líquida em contato com o biofilme aderido ao disco. Com a passagem dos microrganismos aderidos à superfície dos discos pelo líquido, estes absorvem uma nova quantidade de matéria orgânica, utilizada como substrato.

Quando a camada biológica atinge uma espessura excessiva, ela se desprende dos discos e é mantida no meio líquido em suspensão, aumentando a eficiência do sistema (VON SPERLING, 1995).

SPENDEL e DZOMBAK (1991) utilizaram discos rotativos no tratamento de lixiviado de aterros velhos, com baixa DBO e alta carga de amônia. O sistema foi intensamente investigado em escala de bancada, tendo sido usados três reatores; cada reator foi composto por três estágios. A oxidação da amônia foi completa e se obteve uma remoção máxima da DQO de 38 %.

Em estudos com bio-discos de estágio aeróbio simples seguido de unidade anaeróbia, a possibilidade de desnitrificação foi demonstrada pela redução do nitrato produzido pela oxidação da amônia. A seguir são apresentados os resultados.

**Tabela 3.10** – Resultados do tratamento de lixiviado com discos rotativos

| Parâmetro   | RBC 1 | RBC 2 | RBC 3A | RBC 3B |
|---|-------|-------|--------|--------|
| Número de estágios aeróbios                       | 3     | 3     | 3      | 3      |
| Número de estágios anaeróbios                     | 1     | –     | –      | –      |
| Carga hidráulica (L/m <sup>2</sup> .d)            | 7,9   | 17,1  | 23,8   | 49,2   |
| Tempo de detenção hidráulica – por estágio (dias) | 0,77  | 0,35  | 0,25   | 0,12   |
| Carga de DBO <sub>5</sub> (g/m <sup>2</sup> .d)   | 0,21  | 0,44  | 0,62   | 1,3    |
| Carga de DQO (g/m <sup>2</sup> .d)                | 2,8   | 6,1   | 8,5    | 18,4   |
| Carga de amônia (g/m <sup>2</sup> .d)             | 1,2   | 2,6   | 3,7    | 7,3    |
| DBO <sub>5</sub> afluyente (mg/L)                 | 26    | 26    | 26     | 26     |
| DBO <sub>5</sub> efluente (mg/L)                  | 9     | 5     | 6      | 12     |
| Remoção de DBO <sub>5</sub> (%)                   | 65    | 81    | 77     | 54     |
| DQO afluyente (mg/L)                              | 360   | 360   | 360    | 375    |
| DQO efluente (mg/L)                               | 225   | 230   | 240    | 270    |
| Remoção de DQO (%)                                | 37,5  | 36,1  | 33,3   | 28,0   |
| Amônia afluyente (mg/L)                           | 154   | 154   | 154    | 154    |
| Amônia efluente (mg/L)                            | 4     | 4     | 4      | –      |
| Remoção de amônia (%)                             | 98    | 98    | 98     | –      |
| Nitrato afluyente (mg/L)                          | 15    | 15    | 15     | 15     |
| Nitrato efluente (mg/L)                           | 70    | 140   | 150    | 140    |

Fonte: SPENDEL e DZOMBAK. (1991).

### *Digestão anaeróbia*

BOYLE e HAM (1974) estudaram processos anaeróbios para tratamento de lixiviados. Usaram reatores anaeróbios em escala de bancada em três fases distintas; na primeira fase foi verificada a aplicabilidade do processo anaeróbio; na segunda fase, verificaram o efei-

to da carga de orgânicos e do tempo de detenção na eficiência do processo e na terceira foram avaliados os efeitos do controle de temperatura.

Na primeira fase, usando um lixiviado com DBO de 8.400 mg/L, relação DBO/DQO de 0,79 e tempo de detenção de 10 dias, os autores obtiveram uma redução média de 94 % da DQO e de 98 % de DBO, confirmando a eficiência do processo anaeróbio no tratamento de lixiviados.

Variando a carga de DQO aplicada de 0,432 a 2,16 kg/m<sup>3</sup>.d e o tempo de detenção de 5 até 20 dias, com uma relação DBO/DQO de 0,82 e mantendo a temperatura entre 21 e 23 °C, os autores concluíram que existe uma correlação entre o tempo de detenção hidráulica e a performance do processo; o mesmo não ocorrendo para carga orgânica e performance, dentro das variações de carga testadas.

Os resultados da fase três mostram que dentro dos valores de tempo de detenção estudados (12,5 e 20 dias) não foram observados diferenças nas performances para 23 °C, ficando a eficiência de remoção de DQO e DBO em 87 e 97 %, respectivamente. Já, para temperaturas inferiores de 15 e 10 °C, e mantendo o tempo de detenção em 12,5 dias, a eficiência da remoção de DBO caiu para 84 e 26 %, respectivamente. Os resultados mostram ainda que a remoção da DBO é um pouco mais sensível a temperatura do que a remoção da DQO.

Realizando um experimento a nível de bancada usando reator anaeróbio de fluxo ascendente híbrido de manto de lodo e filtro para tratamento de lixiviado do Aterro Bandeirantes, de São Paulo, MORAES e GOMES (1993) obtiveram os seguintes resultados:

**Tabela 3.11** – Condições experimentais e resultados de reator híbrido de manto de lodo e filtro

| Parâmetro                                | Ensaio 1 | Ensaio 2 | Ensaio 3 | Ensaio 4 | Ensaio 5 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| Vazão (l/s)                              | 1,76     | 2,28     | 2,77     | 4,06     | 8,61     |
| Tempo de detenção hidráulica (dias)      | 5,70     | 4,40     | 3,63     | 2,47     | 1,23     |
| Taxa aplicada (kg DQO/m <sup>3</sup> .d) | 3,51     | 2,76     | 4,79     | 6,91     | 11,23    |
| Taxa aplicada (kg DBO/m <sup>3</sup> .d) | 2,32     | 1,82     | 3,16     | 4,56     | 7,41     |
| DQO afluente                             | 13.780   | 16.965   | 17.412   | 12.111   | 19.975   |
| DQO efluente                             | 6.090    | 8.200    | 7.050    | 4.122    | 7.432    |
| Remoção de DQO (%)                       | 55,8     | 51,7     | 59,5     | 66,0     | 62,8     |
| DBO afluente                             | 9.092    | 11.195   | 11.481   | 7.990    | 13.180   |
| DBO efluente                             | 3.480    | 4.672    | 4.038    | 2.349    | 4.138    |
| Remoção de DBO (%)                       | 61,7     | 58,3     | 64,8     | 70,6     | 68,6     |

Fonte: MORAES e GOMES. (1993).

De acordo com os autores este tipo de tratamento é viável como pré-tratamento, devendo haver um tratamento em seqüência para obtenção de um efluente em condições de lançamento no meio ambiente.

SCHAFFER *et al.* (1986) tratando lixiviado altamente concentrado (DBO de 38.500 mg/L e DQO de 60.000 mg/L) usando um filtro anaeróbio de fluxo ascendente, com carga aplicada de 1,07 kg DBO/m<sup>3</sup>.d, obtiveram uma remoção de 95 % de DBO e SST. A remoção de cobre, chumbo e zinco foi de 88, 84 e 83 %, respectivamente.

### 3.5.2.2. Tratamento físico-químico

Os tratamentos físicos baseiam-se na aplicação de forças físicas sobre o líquido, no intuito de promover a separação de contaminantes da água.

Os tratamentos químicos baseiam-se no contato de produtos químicos com o líquido, proporcionando a sua alteração química e conseqüentemente a remoção de alguns contaminantes. É de se observar que processos químicos são usados, em geral, em conjunto com operações físicas. Denomina-se estes processos de tratamentos físico-químicos.

Os tratamentos físicos mais comuns são a evaporação natural, coagulação/floculação e sedimentação, filtração e osmose reversa ou ultrafiltração. Os tratamentos químicos mais comuns são coagulação e precipitação, carvão ativado, troca iônica e oxidação química.

COOK e FOREE (1974) estudaram vários tratamentos físico-químicos para lixiviados de diferentes características. Segundo os autores, o pH é o fator limitante na eficiência do tratamento, já que para cada composto químico há uma faixa de pH ideal para promover a remoção de poluentes.

Estudando tratamentos físico-químicos de lixiviado produzido em células de aterro a nível de bancada, DANTAS (1982) obteve pouca eficiência (28 %) na remoção de matéria orgânica pelo processo de coagulação e precipitação com dosagem de cal de 7.000 mg/L. O tratamento com sulfato de alumínio apresentou uma remoção de DQO de 37 %, apresentando um aumento da turbidez causada pela formação de flocos de difícil remoção. Além da pouca eficiência na remoção de orgânicos, outro problema relatado foi o grande volume de lodo (precipitado) produzido.

QASIN e CHIANG (1994) apresentam uma compilação dos principais tratamentos físico-químicos utilizados, a nível internacional, com sucesso no tratamento de lixiviados. Estes resultados são apresentados nas tabelas 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15.

**Tabela 3.12** – Resultados do tratamento de lixiviados por precipitação química

| DQO afluente (mg/L) | DBO/DQO | DQO/COT | Sistema de tratamento   | Remoção DQO (%) | Dosagem                                     |
|---------------------|---------|---------|---|-----------------|---|
| 14.900              | 0,45    | 3,45    | Cal   | 13              | 2.760 mg/L                                  |
| 9.100               | 0,75    | –       | Cloreto férrico   | 16              | 1.000 mg/L                                  |
| 9.100               | 0,75    | –       | Sulfato de alumínio   | 5               | 1.000 mg/L                                  |
| 10.800              | 0,74    | –       | Cal   | 4               | 1.840 mg/L                                  |
| 558                 | 0,27    | –       | Cal no tratamento de efluente anaeróbio                                       | 8               | 2.700 mg/L                                  |
| 366                 | 0,11    | –       | Cal no tratamento de efluente anaeróbio seguido de polimento por lagoa aerada | 29              | 1.400 mg/L                                  |
| 4.800               | 0,66    | 2,73    | Sulfato de alumínio e cal   | 40              | 2.250 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ e 800 mg/L CaO    |
| 3.400               | 0,81    | –       | Ferrosulfato  | 13              | 2.500 mg/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$             |
| 1.240               | 0,66    | 2,78    | Cal   | 0               | 1.000 mg/L                                  |
| 1.240               | 0,66    | 2,78    | Cal e aeração   | 8               | 210 ml saturado                             |
| 1.234               | 0,68    | 2,88    | Ferro e aeração   | 0               | $FeCl_3$ (200 mg/L) por litro de lixiviado  |
| 1.234               | 0,68    | 2,88    | Sulfato de alumínio e aeração   | 11              | 180 mg/L $Al_2(SO_4)_3$                     |
| 5.033               | 0,60    | –       | Cal   | 24              | 1.350 mg/L                                  |
| 12.923              | 0,57    | –       | Cal   | 26              | 1.200 mg/l                                  |
| 2.000               | 0,36    | –       | Sulfato de alumínio   | 31              | 2.700 mg/L                                  |
| 2.820               | 0,65    | 2,89    | Cal   | 26              | 450 mg/L                                    |
| 2.000               | –       | 0,10    | Sulfato de alumínio e polímero catiônico                                      | 45              | 200 mg/L $Al_2(SO_4)_3$ e 330 mg/L polímero |

Fonte: QASIN e CHIANG. (1994).

**Tabela 3.13**– Resultados do tratamento de lixiviados por oxidação química

| DQO afluente (mg/L) | DBO/DQO | DQO/COT | Sistema de tratamento                          | Remoção DQO (%) | Dosagem                 |
|---------------------|---------|---------|--|-----------------|-------------------------|
| 330                 | 0,07    | 2,57    | Cloração                                       | 33              | 65 ml/l de amostra      |
| 1.500               | 0,75    | –       | Cloração com cálcio $Ca(ClO)_3$ hipoclorídrico | 8               | 8.000 mg/L              |
| 7.162               | 0,75    | –       | Ozonização                                     | 37              | 4 h, 7.700 mg $O_3/L.h$ |
| 4.800               | 0,66    | 2,73    | Cloração                                       | 22              | 2.000 mg $Cl_2/L$       |
| 139                 | 0,04    | 2,10    | Ozonização                                     | 22              | 4 h, 34 mg $O_3/L.h$    |
| 1.250               | –       | 2,90    | Ozonização de efluente de filtro anaeróbio     | 37              | 3 h, 600 mg $O_3/L.h$   |
| 627                 | –       | 2,50    | Ozonização de efluente de lagoa aerada         | 48              | 3 h, 400 mg $O_3/L.h$   |

Fonte: QASIN e CHIANG. (1994).

**Tabela 3.14** – Resultados do tratamento de lixiviados por carvão ativado e resinas trocadoras de íons

| DQO afluente (mg/L) | DBO/DQO | DQO/COT | Sistema de tratamento   | Remoção DQO (%) | Dosagem                                  |
|---------------------|---------|---------|---|-----------------|--|
| 330                 | 0,07    | 2,57    | Carvão ativado no tratamento de efluente de lagoa aerada              | 70              | –  |
| 3.290               | 0,45    | 3,45    | Carvão ativado no tratamento de efluente tratado com cal              | 81              | Tempo retenção de 15 min                 |
| 4.920               | 0,75    | –       | Carvão ativado  | 34              | 16.000 mg/L                              |
| 7.213               | 0,75    | –       | Coluna de carvão ativado  | 59              | Tempo retenção 45 min (após 3 passagens) |
| 5.500               | 0,66    | 2,73    | Carvão ativado  | 60              | 160.000 mg/L                             |
| 184                 | 0,18    | 1,50    | Carvão ativado no tratamento de efluente de lodos ativados            | 91              | 10.000 mg/L                              |
| 120                 | 0,18    | 1,50    | Troca iônica no tratamento de efluente de lodos ativados              | 58              | 5.000 mg/L resina catiônica/aniônica     |
| 2.000               | 0,36    | –       | Coluna de carvão ativado  | 71              | –  |
|                     |         |         | Carvão ativado tratando lixiviado pré-tratado com sulfato de alumínio | 94              | –  |
| 632                 | 0,65    | 2,89    | Coluna de carvão ativado  | 70              | –  |
| 346                 | < 0,1   | 2,55    | Carvão ativado no tratamento de fluente de lagoa aerada               | 70              | –  |
| 527                 | < 0,1   | 2,70    | Troca iônica no tratamento de efluente de lagoa aerada                | 50              | –  |
| 932                 | –       | 2,90    | Carvão ativado no tratamento de efluente de filtro anaeróbio          | 50              | –  |
| 522                 | < 0,1   | 2,70    | Carvão ativado no tratamento de efluente aerado de filtro anaeróbio   | 70              | –  |
| 2.000               | < 0,1   | –       | PAC, 119 mg/L COT/g carvão  | 85              | –  |

Fonte: QASIN e CHIANG. (1994).

**Tabela 3.15**– Resultados do tratamento de lixiviados por osmose reversa

| DQO afluente (mg/L) | DBO/DQO | DQO/COT | Sistema de tratamento  | Remoção DQO (%) | Dosagem             |
|---------------------|---------|---------|--|-----------------|---------------------|
| 53.300              | 0,65    | 2,89    | Osmose reversa de lixiviado com pH 5,5, por membrana de celulose acetato | 56              | permeabilidade 50 % |
| 533.000             | 0,65    | 2,89    | Osmose reversa de lixiviado com pH 8, por membrana de celulose acetato   | 89              | permeabilidade 50 % |
| 900                 | –       | 2,90    | Osmose reversa de efluente de filtro anaeróbio                           | 89              | permeabilidade 77 % |
| 536                 | –       | 2,50    | Osmose reversa de efluente de lagoa aerada, membrana de celulose acetato | 95              | permeabilidade 50 % |

Fonte: QASIN e CHIANG. (1994).

Outro processo físico-químico usado é lavagem de  $\text{NH}_3$  – remoção por *stripping*, que consiste da passagem de bolhas de ar através de uma coluna de lixiviado de modo a reduzir a concentração de  $\text{NH}_3$ , que passa da fase líquida (o lixiviado) para a fase gasosa (o ar). Para deslocar o equilíbrio da amônia em meio aquoso (Equação 3–3) para a direita, é ne-



cessário trazer o pH do lixiviado para próximo de 11, o que é usualmente feito pela adição de cal (LEMA *et al.*, 1998).

As vantagens dos processos físico-químicos em geral incluem partida imediata, fácil automação, insensíveis aos efeitos da variação da temperatura e na maioria dos casos a simplicidade dos materiais e da planta. Em geral, no entanto estas vantagens perdem para as desvantagens: a grande quantidade de lodo gerados pela adição de coagulantes, os elevados custos de implantação e operação da planta e dos produtos químicos (LEMA *et al.*, 1988).

Como resultado, processos físico-químicos são normalmente usados somente para o pré-tratamento ou polimento de lixiviado para complementar tecnologias de degradação biológica. Assim, eles são especialmente úteis para tratamento de lixiviado de aterros velhos e para a eliminação de poluentes perigosos específicos em determinados sítios.

### **3.5.3. Propostas alternativas**

Além dos métodos de tratamento de lixiviados de aterros sanitários anteriormente descritos, muitos outros têm sido propostos e estudados, alguns dos quais serão abordados neste item.

#### ***Evaporação***

Quando a quantidade de lixiviado gerado é pequena podem ser usados métodos que produzem potencial de descarga zero. Um destes métodos é a evaporação.

A evaporação natural ou solar requer grandes áreas, e depende fundamentalmente das condições climáticas, como: temperatura, velocidade do vento, e umidade. Segundo QASIN e CHIANG (1994) o tamanho de áreas para leito de evaporação pode ser reduzido usando a recirculação do lixiviado para o interior do aterro nas épocas de condições climáticas adversas. Neste caso, a recirculação funcionaria como armazenamento temporário do lixiviado no corpo de aterro.

KNOCH e STEGMANN (1993) sugerem que é factível a evaporação de lixiviado usando como fonte de energia a combustão do biogás do próprio aterro. Entretanto, colocam que neste método especial atenção deve ser dada ao controle da emissão atmosférica, e destacam que ainda existem problemas quanto ao material a ser utilizado na construção da planta

de tratamento, principalmente quanto à corrosão.

### ***Aplicação no solo***

Também considerado um método de tratamento com potencial de descarga zero de efluente, a aplicação no solo de águas residuárias domésticas é uma tecnologia de eficiência comprovada; propicia a reutilização de nutrientes e produz um efluente de alta qualidade. O tratamento no solo inclui o uso de plantas, da superfície do solo e da matriz do solo para remover os vários constituintes do lixiviado através de meios físicos, químicos e biológicos. Há três métodos básicos de aplicação no solo: irrigação a baixa taxa; infiltração rápida; e escoamento superficial.

NORDSTEDT (1975) apud QASIN e CHIANG (1994) aplicou lixiviado, por irrigação, sobre pastagens com grama e não verificou modificação na qualidade do solo. As taxas de aplicação não foram especificadas.

Outra alternativa de tratamento de lixiviados são as terras úmidas ou banhados (na língua inglesa denominados de *wetlands*), que são áreas de terra inundadas com profundidades não maiores que 0,6 m e que suportam o crescimento de plantas aquáticas. Esta vegetação serve como suporte de filmes de bactérias, ajuda na filtração e adsorção dos constituintes do lixiviado, transfere oxigênio para a água, e controla o desenvolvimento de algas pela restrição à entrada da luz solar (METCALF e EDDY, 1991). Esta tecnologia é considerada promissora por HOGLAND (1995), principalmente para polimento de lixiviado pré-tratado.

### ***Filtros percoladores***

Filtros percoladores, são filtros biológicos aeróbios formados por um meio suporte, fixo, com grande área superficial e espaços vazios. Um filme biológico desenvolve-se na superfície do meio suporte e os espaços vazios servem para a aeração do sistema e para a passagem do afluente a ser tratado.

GEHLING (1985), usando a infiltração de águas residuárias em leito arenoso verificou 98 % de remoção de DBO, para um leito de 1,70 m de profundidade. A areia utilizada foi proveniente do litoral gaúcho.

Em estudo realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, COTRIM (1997) utilizou filtros percoladores, em escala de laboratório, para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário antigo. Dentre os vários materiais de recheio dos filtros percoladores avali-

ados, o carvão ativado e as aparas de couro curtido *wet blue* foram os que tiveram melhor desempenho, com remoção de 68 e 64 % para DQO, 79 e 95 % para DBO<sub>5</sub> e 89 e 92 % para amônia, respectivamente.

Embora a areia seja conhecida com bom material para sistema de infiltração rápida para tratamento de águas residuárias domésticas em estado bruto, COTRIM (1997) não verificou o mesmo desempenho em filtros deste material no tratamento de lixiviados. O autor verificou remoção de 30 a 61 % da DBO<sub>5</sub> e remoção inferior a 20 % na DQO, para uma coluna de 50 cm de areia.

### ***Tratamento combinando com águas residuárias***

O tratamento combinado de lixiviado com esgoto doméstico em uma ETE (estação de tratamento de esgotos) já existente é um método bastante conveniente. São requisitos para tal: a capacidade de transporte até a ETE, a capacidade da estação em assimilar o lixiviado, a compatibilidade do processo com as características do lixiviado, e a facilidade em lidar com o aumento na produção de lodo.

BOYLE e HAM (1974) demonstraram que um lixiviado com DQO de 10.000 mg/L pode ser tratado com 5 % em volume sem alterar a qualidade do efluente final. HENRY (1985) sugere que, quando possível, a adição de lixiviado a ETES deveria ser o método de disposição preferido. Segundo o autor, estudos demonstraram que lixiviados altamente concentrados (DQO de 24.000 mg/L), quando combinados até 2 % em volume com águas residuárias municipais, não causaram alterações significativas na performance das estações de tratamento. Usando um sistema piloto de tratamento combinado, KELLY (1987) relatou que a adição de lixiviado até 16 % em volume não causou instabilidade ao processo de lodos ativados.

A literatura apresenta vários aterros reais que utilizam o sistema combinado para tratamento de lixiviados: o aterro *Fresh Kills*, da cidade de Nova Iorque (BREEN, 1990); o aterro *Tohbu Fushitani*, de Fukuoka, Japão (MATSUFUJI, 1995); o aterro Bandeirantes, de São Paulo (RÜGER, 1996); o aterro da Extrema, de Porto Alegre (REICHERT e DOS ANJOS, 1997); sendo também prática comum na Suécia (HOGLAND, 1995).

### ***Recirculação***

Um dos mais inovadores e aclamados métodos de tratamento de lixiviado é a

circulação do lixiviado de elevada carga orgânica de volta ao aterro, de modo que ele possa percolar novamente pela massa de resíduos. A recirculação usa o aterro essencialmente como um grande digestor anaeróbio não controlado, que promove o efetivo tratamento anaeróbio do lixiviado. O fluxo da umidade através do aterro estimula a atividade microbiana pois promove um melhor contato entre substratos insolúveis, nutrientes solúveis, e os microrganismos.

QASIN e CHIANG (1994) apresentam as principais vantagens da recirculação:

- aceleração da estabilização dos resíduos no aterro;
- redução substancial nos componentes orgânicos do lixiviado;
- possível redução do volume devido a evapotranspiração;
- atrasa o início da necessidade de outro tipo de tratamento;
- redução dos custos de tratamento.

BARLAZ *et al.* (1990) citam vários estudos sobre a eficiência da recirculação na aceleração da estabilização dos resíduos e no tratamento do lixiviado, ressaltando a importância da neutralização do lixiviado antes da recirculação.

A técnica da recirculação só é propícia para aplicação em aterros onde o balanço hídrico é favorável, ou seja, onde a evapotranspiração é maior que a precipitação média anual (ou somente pode ser utilizada em certos períodos do ano em que isto ocorra). Além disso, LANDRETH (1995) coloca outras questões que ainda necessitam de um aprofundamento maior: a investigação do modo mais adequado de reinjeção do lixiviado no aterro (irrigação superficial ou subsuperficial); a possibilidade de colmatação dos sistemas de reinjeção; a necessidade de manter a uniformidade da umidade da massa de resíduos; o espaçamento físico dos sistemas de injeção, tanto vertical como horizontalmente; e o total de lixiviado a ser recirculado, e com que frequência. A forte compactação que é imposta aos resíduos nos aterros modernos, e a retenção de umidade nas sacolas plásticas apenas parcialmente rasgadas durante a compactação, diminuindo a permeabilidade do aterro, também é um fator levantado pelo autor como limitante à utilização efetiva da recirculação.

Embora a recirculação apresente benefícios quanto a uma considerável redução tanto de carga orgânica quanto do volume de lixiviado, o efluente final ainda não estará em condições de emissão nos cursos d'água receptores, pois ainda pode apresentar elevada DQO e principalmente, amônia (ROBINSON e MARIS, 1985). A recirculação deve portanto ser considerada como o primeiro estágio de um processo de tratamento mais amplo.

### 3.5.4. Adequação e aplicabilidade dos diferentes métodos

Em função da complexidade do problema de tratamento de lixiviado, o estabelecimento de recomendações gerais de validade universal é muito difícil. Todos os métodos apresentam vantagens e desvantagens inerentes em relação a certas facetas do problema. Nas tabelas as seguir são apresentadas a adequação e aplicabilidade dos diferentes métodos.

**Tabela 3.16** – Comparação da performance dos vários processos de tratamento de lixiviado

| Processo de Tratamento         | Matéria Orgânica |                   |                 | Metais  | Ácidos  | Nitrogênio | Poluentes Prioritários | Sólidos |
|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|---------|---------|------------|------------------------|---------|
|                                | Jovem < 5 anos   | Médio 5 – 10 anos | Velho > 12 anos |         |         |            |                        |         |
| <b>Físico</b>                  |                  |                   |                 |         |         |            |                        |         |
| Evaporação natural             | Bom              | Bom               | Bom             | Bom     | Bom     | Bom        | Bom                    | Bom     |
| Flotação                       | NA               | NA                | NA              | Regular | Regular | NA         | Regular                | Bom     |
| Bolhas de ar                   | NA               | NA                | NA              | NA      | Bom     | Bom        | Regular                | NA      |
| Filtração                      | NA               | NA                | NA              | Bom     | NA      | NA         | Na                     | Bom     |
| Membranas                      | Bom              | Bom               | Bom             | Bom     | Regular | Bom        | Bom                    | Bom     |
| <b>Químico</b>                 |                  |                   |                 |         |         |            |                        |         |
| Coagulação/floculação          | Ruim             | Regular           | Ruim            | Bom     | NA      | Regular    | NA                     | Bom     |
| Oxidação química               | Ruim             | Regular           | Regular         | NA      | Regular | NA         | Bom                    | NA      |
| Troca iônica                   | Ruim             | Regular           | Regular         | Bom     | NA      | Regular    | NA                     | Bom     |
| Carvão ativado                 | Ruim             | Regular           | Bom             | NA      | Bom     | NA         | Bom                    | NA      |
| <b>Biológico</b>               |                  |                   |                 |         |         |            |                        |         |
| Crescimento aeróbio suspenso   | Bom              | Regular           | Ruim            | Bom     | Bom     | Regular    | Regular                | Regular |
| Aeróbio de leito fixo          | Bom              | Regular           | Ruim            | Bom     | Bom     | Regular    | Regular                | Regular |
| Crescimento anaeróbio suspenso | Bom              | Regular           | Ruim            | Bom     | Bom     | Regular    | Regular                | Regular |
| Anaeróbio de leito fixo        | Bom              | Regular           | Ruim            | Bom     | Bom     | Regular    | Regular                | Regular |

NA: não aplicável

Fonte: Adaptado de QASIN e CHIANG.

**Tabela 3.17** – Adequação de tratamentos em função de características específicas

|                           |          | Combinado em ETE | Recirculação | Lagoa de estabilização | Aeróbio | Anaeróbio | Físico-químico |
|---------------------------|----------|------------------|--------------|------------------------|---------|-----------|----------------|
| Temperatura média         | <b>E</b> | A                | +            | +                      | +       | +         | A              |
|                           | <b>M</b> | A                | A            | +                      | A       | +         | A              |
|                           | <b>B</b> | A                | A            | -                      | -       | -         | A              |
| Precipitação              | <b>E</b> | A                | -            | -                      | A       | A         | A              |
|                           | <b>M</b> | A                | -            | -                      | A       | A         | A              |
|                           | <b>B</b> | A                | +            | +                      | A       | A         | A              |
| Vazão de lixiviado        | <b>E</b> | -                | A            | A                      | A       | -         | -              |
|                           | <b>M</b> | -                | A            | A                      | A       | A         | A              |
|                           | <b>B</b> | +                | +            | +                      | A       | A         | A              |
| Concentração do lixiviado | <b>E</b> | -                | +            | A                      | -       | +         | -              |
|                           | <b>M</b> | A                | A            | +                      | A       | +         | -              |
|                           | <b>B</b> | +                | A            | +                      | +       | A         | +              |
| Idade do aterro           | <b>V</b> | +                | A            | -                      | -       | -         | +              |
|                           | <b>J</b> | -                | +            | +                      | +       | +         | A              |
| Área disponível           | <b>E</b> | A                | A            | +                      | +       | A         | A              |
|                           | <b>M</b> | A                | A            | A                      | A       | +         | +              |
|                           | <b>B</b> | +                | A            | -                      | -       | +         | +              |

Obs.: **E**: elevado; **M**: médio; **B**: baixo; **V**: velho, **J**: jovem; **+**: favorável; **A**: indiferente; **-**: desfavorável  
 Fonte: LEMA *et al.* (1988).

### 3.6. A vermicompostagem como proposta de tratamento

#### 3.6.1. Descrição sucinta do processo de vermicompostagem

A vermicompostagem é um tipo de compostagem na qual se utilizam as minhocas para digerir a matéria orgânica, provocando sua degradação, e no arejamento e na drenagem do material em fase de maturação (KIEHL, 1985; KNÄPPER, 1990).

A vermicompostagem é um processo de dois estágios. Primeiro, a matéria orgânica é compostada de acordo com os padrões normais, em função da variante de processo utilizada, com redução de microrganismos patogênicos e retorno à condição de temperatura ambiente. Após a estabilização da temperatura, o material compostado é transferido para leitos rasos, para não se aquecer demasiadamente e não compactar, pois os materiais de granulometria fina têm esta tendência. Faz-se então a inoculação das minhocas, e 60 a 90 dias após, obtém-se o vermicomposto pronto, com aumento de macro e micronutrientes e a formação de um húmus mais estável (KIEHL, 1985; KNÄPPER, 1990; HARRIS, 1990).

Para possibilitar um melhor desenvolvimento da ação das minhocas, uma série de condições regulam o processo de vermicompostagem.

BRADY (1983) aponta um série destes fatores que exercem influência sobre a atividade das minhocas de forma genérica, como a preferência das minhocas por ambiente úmido que disponha de boa aeração. Por isso, são mais encontradas em solos de locais altos, de textura média, com elevado conteúdo de umidade do que nas areias ressecadas ou terras baixas com drenagem insuficiente. Precisam de matéria orgânica como fonte de alimentação e em consequência prosperam onde se faz adição ao solo de estrume animal ou resíduos de culturas.

Segundo KIEHL (1985) as minhocas preferem esterco ou outros alimentos, porém engolem toda matéria orgânica desde que não seja muito ácida e não tenha cheiro pronunciado.

Para conseguir uma rápida e eficiente estabilização, KNÄPPER (1990) sugere uma relação C/N (carbono/nitrogênio) entre 25 e 35; situando-se na faixa das necessidades nutricionais do processo de compostagem convencional. Vermicompostando material compostado convencionalmente, CETESB (1987) descreve que as minhocas atuam bem em relações C/N da ordem de 10, resultando no vermicomposto uma relação C/N em torno de 5.

A umidade abiótica do material a ser compostado deve ser mantida na faixa de 70 a 85 %; e o pH deve estar na faixa de 5,5, a 8,5 (HARTENSTEIN apud APPELHOF, 1981). LONGO (1992), por sua vez, cita valores entre 70 e 80 % como intervalo de umidade aplicável.

Para evitar a morte ou fuga das minhocas, a temperatura do material a ser vermicompostado deve ser mantida entre 20 e 28°C (CETESB, 1987). Isto se consegue com a construção de pilhas baixas, com no máximo 0,30 m.

### **3.6.2. Algumas características das minhocas**

As minhocas são classificadas como vermes anelídeos pelo fato de terem o corpo todo segmentado em anéis. É um verme hermafrodita, isto é, possui os dois sexos, porém não se reproduz por autofecundação. É um organismo aeróbio, encontrado geralmente na camada superior de solos húmicos. Segundo LONGO (1992), bastam-lhe 3 mg/L de O<sub>2</sub> para que vivam e proliferem. Em solos encharcados, fogem para a superfície, não pela presença excessiva de água mas pela falta de oxigênio, uma vez que o CO<sub>2</sub> liberado não consegue dissipar-se no interior da pilha devido à camada líquida que o retém.

BIDONE (1995) faz um completo apanhado a respeito da anatomia e reprodução das minhocas. Um breve resumo destas características será aqui apresentado.

As minhocas possuem o corpo afilado nas extremidades, com ligeiro achatamento na região posterior. A “boca” localiza-se no primeiro segmento anterior e é semelhante a uma minitromba, denominada prostômio. O ânus, posicionado na extremidade da cauda, é de formação oval, situado no último anel ou segmento. Entre os anéis 32 e 37, apresentam uma formação distinta, de coloração branco-amarelada, chamada clitelo, responsável pela formação de um invólucro que contém ovos fecundados, denominado casulo.

O processo de formação do casulo inicia-se 48 horas depois da copulação, normalmente praticada por dois exemplares do mesmo tamanho, colocados em sentido contrário para a transferência do esperma de um ventre para o outro. Os casulos ficam depositados no solo após expelidos pelo animal; sendo que em poucos dias – duas a três semanas – eclodem de 10 a 20 ovos de cada casulo, desenvolvendo de duas a três larvas em média (LONGO, 1992).

O aparelho digestivo é constituído de um tubo que se estende da boca até o

ânus, possuindo várias dilatações. À “boca” segue-se a faringe, onde o alimento recebe a “saliva” que ataca as proteínas. Na moela, o alimento já amolecido é triturado pela ação de uma forte musculatura. No intestino estão presentes vários fermentos digestivos.

As minhocas ingerem diariamente o equivalente ao seu próprio peso, utilizando para seu consumo apenas cerca de 3,5 % dos teores de alimentícios recolhidos no solo (LONGO, 1992). A ação das minhocas sobre a matéria orgânica é mais mecânica que biológica. O revolvimento e a aeração do material onde se encontram, bem como a trituração da matéria orgânica que passa pelo trato digestivo destes animais, é um processo puramente mecânico, estando o efeito bioquímico na decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos existentes no intestino das mesmas, de onde os resíduos saem mais ricos em nutrientes e mais facilmente assimiláveis pelas plantas.

Segundo VERAS (1996), as estações de vermicompostagem no Brasil trabalham exclusivamente com a minhoca *Eisenia foetida*, conhecida como vermelha da Califórnia. Esta preferência sustenta-se pelo fato de esta minhoca apresentar grande potencial para compostagem em grande escala, devido a sua rápida taxa de crescimento e reprodução, com precoce maturidade sexual. A *Eisenia foetida*, verme utilizado neste trabalho, fornece um casulo a cada cinco dias, quando em cativeiro (KNÄPPER, 1984).

### **3.6.3. A vermicompostagem no tratamento de resíduos sólidos**

A utilização do processo de vermicompostagem é recente, segundo CARMODY (1979). Os estudos sobre a vermicompostagem de resíduos tiveram início na década de 70, tendo como exemplo estudos realizados em 1970, no Canadá, sobre a vermicompostagem de resíduos sólidos orgânicos e o mercado para o vermicomposto, e também estudos realizados no Japão em 1971 com a vermicompostagem de polpa de papel.

Pode-se fazer a vermicompostagem da maioria dos resíduos sólidos, desde que estes contenham matéria orgânica e que as condições ambientais sejam garantidas às minhocas (CETESB, 1987).

Nos últimos anos vários estudos têm sido conduzidos com a finalidade de avaliar os diferentes aspectos da vermicompostagem. Os mais diferentes tipos de resíduos sólidos têm sido utilizados como substrato, alguns deles que *in natura* podem ser perigosos ao meio



ambiente e transformam-se em materiais nobres quando vermicompostados (BIDONE, 1995). Entre os diversos tipos de resíduos sólidos compostados, listamos os seguintes:

- lodo anaeróbio de estação de tratamento de esgoto sanitário;
- lodo aeróbio de estação de tratamento de esgoto sanitário;
- lodo da indústria de celulose e papel;
- estrume bovino fresco com várias misturas;
- casca de nozes pecã;
- resíduos da indústria frigorífica;
- raspas, aparas e demais sobras da indústria couro-calçadista;
- lodo de curtume com alta concentração de cromo.

HAND e HAYES (1983) desenvolveram alguns experimentos com a *Eisenia foetida*, tentando vermicompostar estrume bovino fresco, sabidamente tóxico para os vermes enquanto não parcialmente degradado e desidratado. O estrume foi misturado em volume, em diferentes proporções de resíduos de papel e solo superficial de floresta, e colocado em pequenos potes. Os potes eram realimentados com estrume superficialmente, de acordo com a necessidade observada. As minhocas eram pesadas semanalmente, estabelecendo-se a menor perturbação possível no substrato.

Os resultados mostraram que nos potes que continham apenas solo, as minhocas perderam peso primeiro rapidamente (1<sup>a</sup> semana), depois mais lentamente (2<sup>a</sup> semana), até atingir um ponto estável (final da 3<sup>a</sup> semana). Nos potes com mistura de 2:1 (solo/estrume), ocorreu ganho de peso por um pequeno período (1<sup>a</sup> semana), e tão logo o estrume foi consumido, as minhocas passaram a perder peso à mesma taxa verificada nos potes com solo apenas. Nos potes com misturas 1:1 (solo/estrume) houve maior ganho de peso inicialmente (1<sup>a</sup> semana) mas novamente ele diminuiu e cessou quando os nutrientes acabaram. Os experimentos com fibras de papel mostraram pequenas diferenças dos realizados como solo. Nos potes que continham apenas fibras, ocorreu perda de peso à mesma taxa verificada para potes apenas com solo (1<sup>a</sup> semana), com recuperação pequena de peso (até a 4<sup>a</sup> semana), e perda de peso uma vez mais (5<sup>a</sup> semana). Ganho de peso ocorreram em ambas as misturas, 2:1 e 1:1 (fibra de papel/estrume) até a 4<sup>a</sup> semana, quando então iniciou-se a perda de peso. Segundo os autores, as fibras de papel são principalmente compostas de fibra de celulose, e contêm relativamente altas concentrações de bactérias e fungos. A presumível utilização pelas minhocas desta microflora, evidenciou que não é somente o substrato que fornece nutrientes, mas tam-

bém os microrganismos que proliferam nas misturas que constituem os alimentos, justificando o comportamento idêntico para as misturas de fibra/estrupe testadas.

Utilizando material previamente compostado como substrato para vermicompostagem com *Eisenia foetida*, CETESB (s.d.) inoculou 1.500 minhocas por metro quadrado, em canteiros de 0,5 m de altura. Neste experimento, a vermicompostagem durou 60 dias, resultando como produto um húmus de excepcionais características para aplicação na agricultura.

Estudando quatro tipos de minhocas – *Eisenia foetida*, *Eudrilus eugeniae*, *Pheretima hawaiana* e *Periony excavatus* – e utilizando com substrato lodos de estações de tratamento de esgotos e outros dejetos similares, WASTE (1984) apresenta os seguintes resultados principais:

- os melhores crescimentos e produção de ovos da *Eisenia foetida* ocorreram em temperaturas entre 20 e 25°C;
- em termos de biomassa e ganho de peso, o melhor crescimento foi da *Eisenia foetida*, que apresentou também a mais alta taxa reprodutiva;
- quando utilizada para estabilizar aerobicamente lodo digerido, a vermiestabilização resultou em um percentual adicional de 10 a 15% na redução de sólidos voláteis;
- a presença de nitrogênio oxidado (nitrato) no líquido lixiviado dos reatores indicou que condições aeróbias foram mantidas nos reatores. Uma queda na concentração de nitratos é uma possível indicação de falha no processo;
- o lodo estabilizado apresentou as seguintes características: sólidos totais de 14 a 24 % em base úmida, sólidos voláteis de 460 a 550 gramas por kg de sólidos totais, DQO de 606 a 730 g/kg ST, nitrogênio orgânico de 27 a 35 g/kg ST e pH de 6,6 7,1.

KNÄPPER (1992) vem vermicompostando cascas de nozes pecã desde 1990. As leiras, com 3 m de largura, 0,5 m de altura e 50 m de comprimento, são cobertas com grama de pomar, para evitar a penetração excessiva de luz nas pilhas. Apesar do material ter parecido, a princípio, muito difícil de ser processado, com pouco mais de um ano de trabalho os resultados obtidos mostraram-se além do esperado.

RIBEIRO (1992) utilizou o processo da vermicompostagem de resíduos sólidos de indústrias frigoríficas, sendo as pilhas constituídas de uma camada de 0,40 m de material gastrointestinal e 0,50 m de capim. As leiras sofreram correção de umidade e aeração. Ao fim de 50 dias de evolução das leiras, foi feita a inoculação de *Eisenia foetida*, com aplicação de

2kg de meio de cultura contendo as minhocas por metro quadrado de superfície. O tempo de vermicompostagem foi de 45 dias.

BIDONE (1995) estudou a vermicompostagem de mistura de resíduos sólidos de curtume (com altas concentrações de cromo – até 60.000 mg/kg) codispostos com substrato orgânico de resíduos sólidos urbanos previamente compostados. As leiras foram montadas em vasos cerâmicos com 0,30 m de altura, que após umedecidas foram inoculadas com 150 minhocas cada, o que representou uma taxa de aplicação de 2,079 minhocas/m<sup>2</sup>.leira, com um peso vivo de 0,039 kg/leira. A umidade das leiras foi mantida com a adição diária de 0,13 litros de água bruta por dia e por leira, na primeira fase, e 0,13 litros a cada dois dias, na segunda fase, tentando com isto evitar o excesso de umidade ocorrido pela rega diária na primeira fase.

O tempo de vermicompostagem ótimo sugerido pelo autor, para substratos e condições similares às estabelecidas na experimentação, é de 45 a 60 dias. Em meios inóspitos às minhocas, como em ambientes com altas concentrações de metais, taxas de aplicações de minhocas mais altas são sugeridas, uma vez que fugas podem ser verificadas, por isso o autor utilizou número superior às 1.500 minhocas por metro quadrado de leira sugeridas como ótimo por CETESB (s.d.).

Os resultados obtidos por BIDONE (1995) mostraram a viabilidade de vermicompostagem de resíduos sólidos de curtume codispostos com substrato orgânico (composto de resíduos sólidos). O húmus mostrou grande eficiência na atenuação do cromo, embora o autor suspeite de o meio filtrante colocado ao fundo das leiras ter contribuído para esta atenuação. As minhocas não bioacumularam o metal estudado, excretando praticamente o todo ingerido quando submetidas à dieta de substrato orgânico destituído do elemento. O efeito tóxico do cromo nas minhocas se fez sentir a partir de misturas com concentrações do metal entre 20.000 e 60.000 mg/kg.

VERAS (1996) estudando a vermicompostagem de lodos de lagoas de estabilização consorciado com composto de resíduo orgânico urbano, estabelecendo como período do processo da vermicompostagem em 75 dias. O autor estabeleceu como teor de umidade em torno de 40 % para a condução do experimento, o que equivale a cerca da metade dos teores de umidade citados por APPELHOF (1981) e LONGO (1992). A escolha deste valor deveu-se ao fato que o aumento do teor de umidade acarreta a perda de água através do fundo das leiras, carreando elementos e composto químicos presentes na mistura lodo/composto, alterando a

composição química do material a ser analisado. Além disso, as minhocas apresentaram melhor adaptação quando a umidade do substrato girava em torno de 40 %.

COUTINHO (1996) cita a excelente aceitação pelas minhocas de lodo de origem anaeróbia – proveniente de processo de tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos – sem adição de outros materiais. O estudo foi conduzido com umidade em torno de 43 %. O autor sugere que os valores de umidade normalmente utilizados e citados na bibliografia devem ser revistos, de modo a se levar em conta a densidade aparente do material.

#### **3.6.4. Utilização da vermicompostagem para tratamento de lixiviado**

A capacidade demonstrada, e comprovada pelos muitos estudos realizados, das minhocas de estabilizarem os mais variados resíduos sólidos, alguns deles até considerados perigosos anteriormente a serem submetidos ao processo, aliado ao fato de as minhocas serem organismos estritamente aeróbios, levaram a proposição do presente estudo.

Lixiviados de aterro sanitário apresentam altas concentrações de nitrogênio (ver Tabela 3.2), prevalecendo as formas amoniacal e orgânica. Tratamentos anaeróbios, aos quais normalmente são inicialmente submetidos esses lixiviados, não removem o nitrogênio, que se lançado no ambiente pode levar a eutrofização dos corpos d'água. O processo de nitrificação, passagem do nitrogênio para a forma mais oxidada de nitrato, só ocorre na presença do oxigênio. Como a vermicompostagem é um processo aeróbio, espera-se que ocorra a nitrificação, quando utilizada no tratamento de lixiviados.

Através de mecanismos de complexação ou de quelação, o húmus pode reter certos micronutrientes. Quelação, que é uma forma de complexação, é o equilíbrio entre um íon metálico e o agente complexante, o húmus, sem que esse íon tome parte na composição química do agente complexante; ou seja, fica apenas pinçado, seqüestrado ou quelado. O húmus retém os metais com diferentes forças, sendo a seguinte a ordem crescente da energia de retenção: cádmio, mercúrio, cálcio, boro, magnésio, manganês, zinco, cobalto, níquel, cobre e chumbo (KIEHL, 1985). KIEHL (1985) descreve que em 1950, o químico inglês Way, fez passar por um funil contendo húmus, um líquido de esterqueira rico em amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), ficando a amônia retida pelo húmus. Ocorre uma retenção físico-química denominada de adsorção, ficando os cátions metálicos e o amônio retidos eletrostaticamente pelas cargas negativas das micelas coloidais húmicas.

BIDONE e POVINELLI (1996) verificaram a capacidade atenuadora do húmus ou vermicomposto na mobilidade do cromo durante o processo. Segundo os autores, os aspectos que contribuíram para esse fato, foram o pH elevado do húmus diminuindo a solubilidade do metal e determinando a sua precipitação e o seu aprisionamento na instância das próprias leiras, e a grande capacidade de retenção de água de rega pelo húmus atenuando o volume de lixiviado. O cromo ficou retido no húmus, complexado, em estado amorfo, quelado.

A matéria orgânica crua tem capacidade de retenção de água de 80%; a medida que vai sendo humificada, essa capacidade de reter água se eleva, alcançando em média 160%; o húmus puro alcança valores muitos maiores, podem chegar a cerca de 500% (KIEHL, 1985).

A vermicompostagem tem capacidade de estabilizar lodos líquidos com um total de sólidos tão baixo quanto 0,6 %, desde que o líquido drene rapidamente, e as condições aeróbias sejam mantidas na unidade de vermicompostagem (WASTE, 1984).

Pelo exposto, em função das características complexantes e quelantes do vermicomposto há indícios inequívocos da eficiência do processo no tratamento de lixiviado de aterros sanitários. A comprovação desta possibilidade foi proposta através de metodologia descrita a seguir.

## **4. METODOLOGIA**

Para avaliar a eficácia da vermicompostagem no tratamento de lixiviado de aterro sanitário, foram montadas leiras com dois diferentes tipos de substratos orgânicos, submetendo as leiras a quatro diferentes taxas de rega – aplicação do lixiviado, fazendo a rega com lixiviado durante o processo de vermicompostagem (com as minhocas) e sobre o vermicomposto pronto (sem as minhocas), e utilizando o insuflamento de ar em leiras de altura maior que a tradicional. O experimento foi dividido em quatro fases distintas, ao longo de dez meses (janeiro a outubro de 1997).

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Tecnologias Ambientais do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre.

### **4.1. Os substratos orgânicos utilizados na pesquisa**

Dois materiais orgânicos foram utilizados para servirem como substrato orgânico às minhocas: composto de resíduos sólidos urbanos e uma mistura desse mesmo composto com estrume bovino curado.

Como o município de Porto Alegre não dispunha, até a data da realização desta pesquisa, de uma unidade de compostagem de resíduos orgânicos urbanos, o composto utilizado como substrato foi conseguido junto ao município de Ivoti, comunidade de 20.000 habitantes localizada na Região Metropolitana de Porto Alegre.

O estrume bovino foi conseguido junto a um agricultor do interior do município de Montenegro. Foi recolhido o estrume não muito jovem e seco, junto a esterqueira. Como o material se encontrava em partes graúdas, foi necessário fazer a moagem, utilizando um triturador de resíduos orgânicos tipo forrageiras, para homogeneização e permitindo uma melhor mistura com o composto e assimilação pelas minhocas.

Os substratos básicos foram caracterizados em termos dos parâmetros de interesse da pesquisa, mediante a realização das seguintes análises:

- pH
- Carbono orgânico total
- Nitrogênio total de Kjeldhal
- Fósforo total
- Potássio total
- Cálcio total
- Magnésio total
- Cobre total
- Zinco total
- Ferro total
- Manganês total
- Sódio total
- Enxofre total
- Íon amônio
- Nitrato
- Chumbo total
- Cádmio total
- Níquel total
- Cromo total

As análises dos sólidos foram realizadas no Laboratório de Tecnologias Ambientais do IPH/UFRGS e no Laboratório de Análises, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

#### **4.2. Procedência, caracterização e conservação dos lixiviados afluentes**

O lixiviado utilizado como afluente às leiras de vermicompostagem foi proveniente do Aterro Sanitário Zona Norte, gerenciado e operado pelo Departamento Municipal de Limpeza Urbana de Porto Alegre – DMLU. Este aterro recebeu resíduos sólidos dispostos a céu aberto, ou seja, na forma de lixão, de 1985 até 1990. A partir daí, o antigo lixão começou a ser remediado, adotando-se as técnicas de aterramento sanitário para a disposição dos resíduos até julho de 1998, quando foi encerrado. Ocupando uma área total de 49,6 ha, o aterro

foi dividido em nove células de tamanhos variados. Em cada célula, o sistema de drenagem do lixiviado foi dimensionada para funcionar também como filtro anaeróbio. Após passar por esse filtro, o lixiviado chega a um Poço de Monitoramento e Recalque – PMR, de onde é recirculado para o interior da célula, por bombeamento e tubulação específica. Descrição mais detalhada do processo de remediação adotado podem ser encontradas em ESCOSTEGUY *et al.* (1991).

A Célula 4, de onde foi retirado o lixiviado utilizado na pesquisa, localiza-se na parte central do aterro, ao lado da Unidade de Triagem de resíduos seletivos, conforme identificado na figura 4.1. Esta célula, além dos resíduos recebidos na época do lixão, até 1983, recebeu resíduos de 1992 a meados de 1993, durante a remediação daquele antigo lixão. A escolha desse ponto de coleta deveu-se ao fato de a matéria orgânica encontrar-se em avançado estado de estabilização, e o lixiviado apresentar elevada concentração de amônia e NTK.



**Figura 4.1** – Vista área do Aterro Sanitário Zona Norte, e Célula 4 no detalhe

As coletas eram feitas com auxílio de moto bomba portátil à gasolina acoplada à tubulação de recirculação já existente (Fig. 4.2), sendo o lixiviado armazenado em bombonas plásticas de 20 L e transportado ao laboratório, onde era conservado a 4°C. As coletas foram realizadas a cada duas semanas, sempre as segundas-feiras pela manhã.

Para caracterização do lixiviado do Aterro Zona Norte, utilizado como afluente aos vasos de vermicompostagem, foram eleitos os mesmos parâmetros e utilizada a mesma metodologia de análise referidos para os efluentes das leiras, com o detalhamento sendo apre-



sentado no item 4.3 a seguir. A caracterização de cada amostra coletada foi feita duas vezes. A primeira, logo após a coleta; e a segunda na quinta-feira subsequente (10 dias após), de modo a verificar a modificação nos parâmetros durante a conservação do lixiviado.



**Figura 4.2** – Detalhe da coleta de lixiviado no Aterro Sanitário Zona Norte

### **4.3. Determinação dos parâmetros físico-químicos das amostras líquidas**

As análises físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologias Ambientais do IPH e complementadas no LABORQUÍMICA – Laboratório de Análises Químicas Ltda., laboratório que presta serviços ao DMLU (instituição com a qual o autor mantém vínculo empregatício). No LABORQUÍMICA foram analisados os parâmetros DQO, DBO<sub>5</sub>, amônia, NTK e nitrato.

Os procedimentos analíticos realizados no IPH foram subsidiados pelo Instituto e pela FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, convênio PROSAB nº 6696061300, e os procedimentos realizados no LABORQUÍMICA foram subsidiados pelo DMLU, uma vez que o Departamento tinha interesse e apoiava a realização da pesquisa.

A tabela 4.1 apresenta os parâmetros analisados, a metodologia aplicada e o laboratório onde foram realizadas as análises.

**Tabela 4.1** – Parâmetros físico-químicos analisados

| <b>Parâmetro</b>   | <b>Unidade</b>       | <b>Metodologia (*)</b>           | <b>Laboratório</b> |
|--------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------|
| pH                 | –                    | Potenciométrico                  | IPH                |
| DQO                | mg O <sub>2</sub> /L | Dicromatometria – Refluxo aberto | LABORQUÍMICA       |
| DBO <sub>5</sub>   | mg O <sub>2</sub> /L | Potenciometria – Elet. membrana  | LABORQUÍMICA       |
| NTK                | mg/L – N             | Titulometria – Destilação prévia | LABORQUÍMICA       |
| Amônia             | mg/L – N             | Titulometria – Destilação prévia | LABORQUÍMICA       |
| Nitrato            | mg/L – N             | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Nitrito            | mg/L – N             | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Ácido acético      | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Ácido propiônico   | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Ácido iso-butírico | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Ácido butírico     | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Ácido iso-valérico | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Ácido valérico     | mg/L                 | Cromatografia gasosa             | IPH                |
| Fosfato            | mg/L                 | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Sulfato            | mg/L                 | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Fluoreto           | mg/L                 | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Cloreto            | mg/L                 | Cromatografia iônica             | IPH                |
| Potássio           | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Cálcio             | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Sódio              | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Magnésio           | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Ferro              | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Manganês           | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Níquel             | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Zinco              | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Cobre              | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Cádmio             | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Cromo              | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |
| Chumbo             | mg/L                 | Digestão e absorção atômica      | IPH                |

\* Metodologia de análises de acordo com STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER (1992)

#### 4.4. Montagem e condução do experimento

Para a condução do experimento, foi montado em laboratório uma bancada de madeira para a colocação dos vasos e dos frascos coletores de percolado efluente. O desenvolvimento da pesquisa foi subdividido em quatro fases distintas, que serão descritas a seguir. O esquema simplificado da montagem dos experimentos, mostrando numeração dos vasos, tipo de substrato, tipo de líquido de rega e taxa de aplicação, é apresentada na figura 4.3.

##### 4.4.1. Fase 1

###### 4.4.1.1. Preparação dos vasos

Nesta fase foram montadas doze leiras (vasos) de vermicompostagem, corres-

pondentes a três conjuntos com quatro unidades cada. Utilizou-se vasos plásticos, na cor preta, com 0,25 m de altura útil e área superficial de 0,04672 m<sup>2</sup>, correspondendo assim a um volume de aproximadamente 7,5 L de substrato em cada vaso. A altura das leiras de vermicompostagem, dependendo das características do substrato, varia de 0,30 m (BIDONE, 1995) a 0,50 m (KNÄPPER, 1992; CETESB, s.d.). Nessa pesquisa, para garantir as condições aeróbias necessárias ao desenvolvimento dos vermes, uma vez que a umidade no vasos deveria ser alta o suficiente para permitir a geração de percolados efluentes, optou-se pela altura de 0,25 m.

Para facilitar a drenagem e reduzir o risco de entupimento do tubo plástico de drenagem que levava o percolado efluente até o frasco coletor, na parte inferior dos vasos foi colocada uma camada de 1,0 cm de espessura de brita nº 0 (brita número zero) entre duas camadas de filtro de geotêxtil não-tecido de poliéster de gramatura 300 g/m<sup>2</sup>.

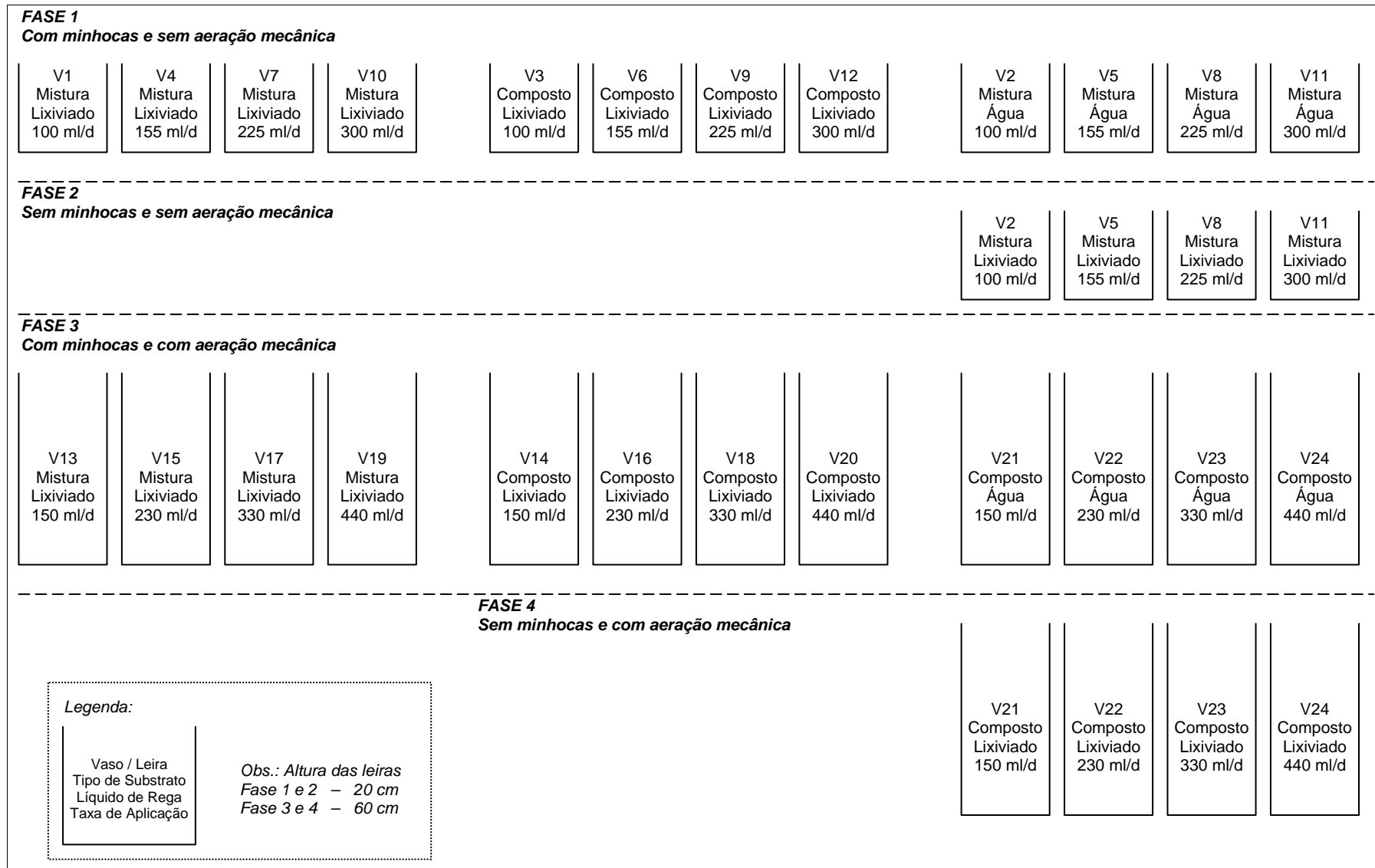
Quatro destes vasos receberam 5,000 kg de composto; e oito, composto enriquecido por estrume bovino curado (para melhorar os aspectos nutricionais do composto), peso da mistura de 4,150 kg na proporção em peso de 1:1. Os vasos foram numerados e etiquetados, ficando a seguinte distribuição dos substratos: composto, nos vasos V3, V6, V9 e V12; e mistura nos vasos V1, V2, V4, V5, V7, V8, V10 e V11.

Na figura 4.4 é apresentado um panorama geral da Fase 1 do experimento montado em bancada. Nota-se a disposição das leiras (vasos plásticos) e as mangueiras e garrafas coletoras do percolado efluente.

#### **4.4.1.2. Procedimento preliminar à inoculação com as minhocas**

Montadas as leiras, nas três semanas que antecederam a inoculação com as minhocas, em cada uma foi aplicado um volume de 300 ml/d de água destilada e deionizada, de modo que estas atingissem a capacidade de armazenamento de líquidos e começassem uma lixiviação mais regular, uma vez que a matéria orgânica e o húmus têm grande capacidade de retenção de umidade, conforme descrito por KIEHL (1985).

Uma amostra do percolado efluente de cada unidade, proveniente da aplicação de água destilada e deionizada, foi coletada e analisada em laboratório, em termos de macro e de micronutrientes.



**Figura 4.3** – Esquema simplificado da montagem das quatro fases da pesquisa

#### 4.4.1.3. Inoculação das leiras

A minhoca utilizada na pesquisa foi a *Eisenia foetida*, ou minhoca vermelha da Califórnia, que segundo BIDONE (1995) é o verme mais utilizado em experimentos de vermicompostagem. Os vermes foram conseguidos junto ao Sr. Osni Rosa, produtor de vermicomposto da zona sul de Porto Alegre. Tomando como base que cada minhoca ingere por dia o seu equivalente em peso, e estabelecendo em 45 dias o tempo de vermicompostagem, definiu-se as seguintes taxas de aplicação de minhocas:

- 111,11 g de minhocas nos vasos com composto (V3, V6, V9 e V12);
- 92,22 g de minhocas nos vasos com mistura (V1, V2, V4, V5, V7, V8, V10 e V11).

A inoculação das minhocas deu-se no dia 22 de janeiro de 1997, sendo que neste momento, além da pesagem foi realizada a contagem do número de vermes.

#### 4.4.1.4. Taxas de aplicação do lixiviado afluyente

Para a definição das taxas de aplicação do lixiviado sobre as leiras de vermicompostagem, tomou-se como base a precipitação média de 1.200 mm/ano em Porto Alegre. Se o processo de vermicompostagem ocorre-se em local sujeito à intempérie, isso equivaleria a um volume de 155 ml/d sobre cada leira, para a área superficial dos vasos utilizados. Estabeleceu-se, assim, para aplicação diária, além do volume correspondente a precipitação média, um volume menor e dois maiores que aquele valor, resultando nas seguintes taxas para cada conjunto de quatro vasos: 100, 155, 225 e 300 ml/d.

A aplicação, ou rega, do lixiviado é mostrada em detalhe na figura 4.5.

#### 4.4.1.5. Sistemática de rega

A aplicação do lixiviado na Fase 1 foi de 28 de janeiro a 17 de março de 1997, sendo a rega feita durante seis dias por semana, sempre as 10 h da manhã.

Quatro das leiras que continham mistura de composto e estrume e as quatro leiras que continham composto foram regadas com as taxas especificadas anteriormente. A tabela 4.2 apresenta as taxas utilizadas em cada leira durante essa fase.

As restantes quatro leiras com mistura foram regadas com volumes idênticos de líquido, só que este era água destilada e deionizada. Isto deveu-se a intenção em se produ-

zir vermicomposto em condições ambientais menos agressivas, para num segundo momento, retirando a minhoca das leiras, aplicar-se o lixiviado de aterro sobre o húmus assim produzido.

**Tabela 4.2** – Identificação dos vasos da **Fase 1** com relação aos substratos, tipo de líquido de rega e taxas de aplicação utilizados

| Líquido de Rega | Substrato | Taxa de aplicação |                            |                           |             |                            |                           |             |                            |                           |             |                            |                           |
|-----------------|-----------|-------------------|----------------------------|---------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-------------|----------------------------|---------------------------|
|                 |           | 100<br>ml/d       | 2,1<br>L/m <sup>2</sup> .d | 13<br>L/m <sup>3</sup> .d | 155<br>ml/d | 3,3<br>L/m <sup>2</sup> .d | 20<br>L/m <sup>3</sup> .d | 225<br>ml/d | 4,8<br>L/m <sup>2</sup> .d | 30<br>L/m <sup>3</sup> .d | 300<br>ml/d | 6,4<br>L/m <sup>2</sup> .d | 40<br>L/m <sup>3</sup> .d |
| Lixiviado       | Mistura   |                   | V1                         |                           |             | V4                         |                           |             | V7                         |                           |             | V10                        |                           |
| Água            | Mistura   |                   | V2                         |                           |             | V5                         |                           |             | V8                         |                           |             | V11                        |                           |
| Lixiviado       | Composto  |                   | V3                         |                           |             | V6                         |                           |             | V9                         |                           |             | V12                        |                           |

#### 4.4.2. Fase 2

Após a vermicompostagem das leiras V2, V5, V8 e V11 (leiras com mistura e que foram regadas com água destilada e deionizada) na Fase 1, foram retiradas as minhocas e os casulos dessas leiras, sendo somente o vermicomposto retornado aos mesmos vasos, mantendo-se a numeração original. Mantendo-se os volumes já mencionados de 100, 155, 255 e 300 ml/d, respectivamente, os vasos receberam lixiviado de aterro sanitário, sendo observados por um período que foi de 5 de maio a 10 de julho de 1997.

O sistema de drenagem na base dos vasos e a sistemática de rega foram os mesmos utilizados na Fase 1.

#### 4.4.3. Fase 3

##### 4.4.3.1. Preparação dos vasos

Nesta fase foram montados outras doze leiras de vermicompostagem, correspondentes a três conjuntos com quatro unidades cada. Leiras com 0,60 m de altura foram utilizadas nessa fase, sendo que vasos cerâmicos foram especialmente fabricados com esta altura, tendo o diâmetro constante de 0,15 m. O volume dos vasos era aproximadamente 11,0 L. Na figura 4.6 é apresentada uma vista geral do experimento nessa fase.

Para facilitar a drenagem e reduzir o risco de entupimento do tubo plástico de drenagem que levava o percolado efluente até o frasco coletor, assim como na montagem dos vasos plásticos das fases anteriores, foi colocado um sistema de drenagem no fundo dos vasos.

Os substratos utilizados e as finalidades das leiras, embora de maior profundidade, foram os mesmos que das fases anteriores. A diferença que se estabeleceu nesta fase, relativamente a Fase 1, foi que agora oito destes vasos (ao invés de quatro) receberam 9,600 kg de composto; e apenas quatro composto enriquecido por estrume bovino curado (para melhorar os aspectos nutricionais do composto), peso da mistura de 6,200 kg na proporção em peso de 1:1. Os vasos foram numerados e etiquetados, ficando a seguinte distribuição dos substratos: composto, nos vasos V14, V16, V18, V20, V21, V22, V23 e V24; e mistura nos vasos, V13, V15, V17 e V19.

#### **4.4.3.2. Procedimento preliminar à inoculação com as minhocas**

Montadas as leiras, nas três semanas que antecederam a inoculação com as minhocas, em cada uma foi aplicado um volume de 250 ml/d de água destilada e deionizada, pelas mesmas razões referidas na Fase 1. Nessa fase não foram analisadas amostras do percolado de cada vaso experimentado.

#### **4.4.3.3. Inoculação das leiras**

Findo o período acima descrito, e após se proceder a pesagem e contagem do número de indivíduos correspondentes a esse peso, no dia 15 de junho de 1997 foi realizada a inoculação das leiras com as minhocas, utilizando-se a *Eisenia foetida* de mesma procedência da Fase 1. Com base no peso de substrato em cada vaso e considerando que cada minhoca ingere por dia o seu equivalente em peso, e estabelecendo em aproximadamente 60 dias o tempo de vermicompostagem, definiu-se as seguintes taxas de aplicação de minhocas:

- 215,0 g de minhocas nos vasos com composto (V14, V16, V18, V20, V21, V22, V23 e V24);
- 140,0 g de minhocas nos vasos com mistura (V13, V15, V17 e V19).

#### **4.4.3.4. Taxas de aplicação do lixiviado afluyente**

Na Fase 3, em função do maior volume de substrato sólido colocado em cada unidade, alterou-se o volume de líquido aplicado às leiras relativamente à Fase 1. Na Fase 1, o volume de substrato sólido em cada vaso foi 7,5 L; nesta fase, o volume foi de 11,0 L. Relacionando-se ambos, verifica-se que houve um incremento de volume de 47 %. Afetando-se des-

te percentual os volumes utilizados na Fase 1, de 100, 155, 255 e 300 ml/d, e arredondando-se os valores para múltiplos de 5, obteve-se para cada leira do conjunto de quatro leiras, os volumes aplicados de 150, 230, 330 e 440 ml/d, respectivamente.

#### 4.4.3.5. Sistemática de rega

A aplicação do lixiviado na Fase 3 foi de 19 de junho a 28 de agosto de 1997; sendo a rega feita durante seis dias por semana.

Quatro das leiras que continham mistura de composto e estrume e as quatro leiras que continham composto foram regadas com as taxas especificadas anteriormente. A tabela 4.2 apresenta as taxas utilizadas em cada leira durante essa fase.

As restantes quatro leiras com composto foram regadas com volumes idênticos de líquido, só que este era água destilada e deionizada. Na Fase 4, o vermicomposto assim produzido, e agora sem as minhocas, foi submetido a rega com lixiviado, da mesma forma que um dos conjuntos da Fase 1.

**Tabela 4.3** – Identificação dos vasos da **Fase 3** com relação aos substratos, tipo de líquido de rega e taxas de aplicação utilizados

| Líquido de Rega | Substrato | Taxa de aplicação |                            |                           |             |                             |                           |             |                             |                           |             |                             |                           |
|-----------------|-----------|-------------------|----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|
|                 |           | 150<br>ml/d       | 8,5<br>L/m <sup>2</sup> .d | 13<br>L/m <sup>3</sup> .d | 230<br>ml/d | 13,0<br>L/m <sup>2</sup> .d | 20<br>L/m <sup>3</sup> .d | 330<br>ml/d | 18,7<br>L/m <sup>2</sup> .d | 30<br>L/m <sup>3</sup> .d | 440<br>ml/d | 24,9<br>L/m <sup>2</sup> .d | 40<br>L/m <sup>3</sup> .d |
| Lixiviado       | Mistura   | V13               |                            |                           | V15         |                             |                           | V17         |                             |                           | V19         |                             |                           |
| Lixiviado       | Composto  | V14               |                            |                           | V16         |                             |                           | V18         |                             |                           | V20         |                             |                           |
| Água            | Composto  | V21               |                            |                           | V22         |                             |                           | V23         |                             |                           | V24         |                             |                           |

#### 4.4.3.6. Insuflamento de ar no interior das leiras

Como nessa fase as leiras têm altura maior, aliado as altas taxas de aplicação de líquido utilizadas na pesquisa, visando estabelecer condições aeróbias nas camadas inferiores das leiras e oportunizando às minhocas atividades a profundidades maiores, foi realizado o insuflamento de ar com a utilização de compressor de ar com volume de balão acumulador de 50 litros (Fig. 4.5). Na figura 4.7 pode-se notar as mangueiras de condução e distribuição do ar insuflado na metade inferior da leiras (vasos cerâmicos).

Para fazer as injeções de ar foi utilizada uma mangueira plástica com diâmetro interno de 12,5 mm (½”), que foi introduzida de forma espiral nos vasos, sendo que furos na mangueira para saída do ar foram feitos somente na parte correspondentes aos 30 cm mais ao



fundo das leiras. Na figura 4.7 é apresentado detalhe da colocação da mangueira de injeção de ar no interior dos vasos.

As exigências de O<sub>2</sub> em processos de compostagem convencional, são da ordem de 300 a 600 m<sup>3</sup> ar/m<sup>3</sup> sólidos voláteis (TASK, 1992), o que corresponde de 63 a 126 m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>, uma vez que é de 21 % a concentração de O<sub>2</sub> no ar.

A pressão máxima de serviço do compressor é de 120 psi, correspondentes a 8,17 atm; para se obter a pressão absoluta, deve-se somar 1,0 atm, resultando uma pressão de operação máxima (P<sub>1</sub>) de 9,17 atm. Considerando-se a transformação isotérmica a 25°C, de acordo com a equação 4.1, obtemos o volume aplicado pelo compressor a cada esvaziamento do balão acumulador (V<sub>2</sub>), que é de 0,458 m<sup>3</sup>.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 \quad (4.1)$$

onde: P<sub>1</sub> = pressão de operação máxima do compressor (9,17 atm)

V<sub>1</sub> = volume do balão acumulador (50 L)

P<sub>2</sub> = pressão na instância das leiras (pressão atmosférica de 1,0 atm)

V<sub>2</sub> = volume de ar aplicada na leiras a cada esvaziamento do balão acumulador

Foram realizadas seis injeções por dia de ar nas leiras, três pela manhã e três à tarde, totalizando 2,748 m<sup>3</sup> de ar aplicado sobre o conjunto de 12 leiras. Considerando-se a concentração de 21 % de O<sub>2</sub> no ar, e admitindo-se a distribuição igualitária entre os vasos, resulta em 0,048 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/leira.d. Como o volume de substrato de cada leira é de 11,0 L (0,011 m<sup>3</sup>), obtém-se uma taxa de aplicação T<sub>ar</sub> de 4,36 m<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> substrato.d.

#### 4.4.4. Fase 4

Assim como na Fase 2 em relação à Fase 1, após a vermicompostagem das leiras V21, V22, V23 e V24 (leiras com composto e que foram regadas com água destilada e deionizada) na Fase 3, foram retiradas as minhocas e os casulos dessa leiras, sendo o vermicomposto retornado aos mesmos vasos, mantendo-se a numeração original. Mantendo-se os volumes já mencionados de 150, 230, 330 e 440 ml/d, respectivamente, os vasos receberam lixiviado de aterro sanitário, sendo observados por um período que foi de 5 de setembro a 3 de novembro de 1997.

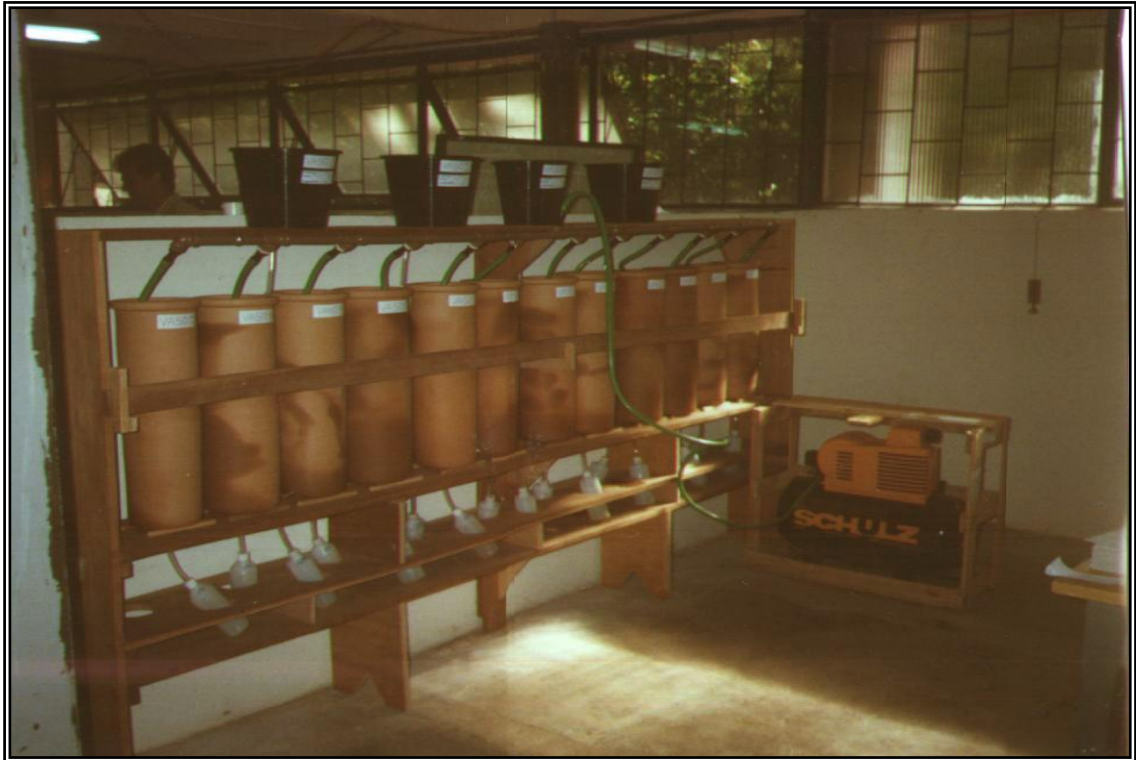
O sistema de drenagem na base dos vasos e a sistemática de rega foram os mesmos utilizados na Fase 3.



**Figura 4.4** – Vista geral do experimento durante a **Fase 1**



**Figura 4.5** – Detalhe da aplicação do lixiviado sobre as leiras na **Fase 1**



**Figura 4.6** – Vista geral do experimento durante a **Fase 3** (Na parte superior da bancada observa-se os vasos plásticos da **Fase 2**). A direita, o insuflador de ar (compressor) utilizado.



**Figura 4.7** – Detalhe da mangueira de injeção de ar nos vasos cerâmicos (**Fase 3 e 4**)

## **4.5. Coleta e preservação das amostras dos percolados efluentes**

### **4.5.1. Coleta do percolado efluente**

A rega das leiras foi feita sempre pela manhã, e a coleta dos percolados nos frascos coletores, sempre realizada à tarde, diariamente. Como a caracterização físico-química dos percolados foi realizada semanalmente, sempre as quintas-feiras, a amostra de cada leira que era levada para análise era, portanto, uma amostra composta resultante do efluente de seis dias de rega.

### **4.5.2. Preservação das amostras**

As amostras semanais compostas dos percolados efluentes foram conservadas ao longo da semana (de sexta a quinta-feira). A preservação das amostras seguiu o estabelecido pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1992), sendo as técnicas definidas de acordo com os parâmetros a serem analisados (ver Tab. 4.1), como segue:

- DQO, NTK e amônia, preservação com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e resfriamento a 4°C;
- cromatografia iônica, resfriamento a 4°C após filtragem;
- cromatografia gasosa, preservação com ácido fórmico e resfriamento a 4°C;
- absorção atômica, digestão com ácido nítrico;
- as amostras para determinação de pH e DBO<sub>5</sub> não foram preservadas, sendo sempre coletadas as quintas-feiras e imediatamente analisadas.

## **4.6. Análise dos substratos sólidos**

Os substratos de cada vaso foram caracterizados em termos dos parâmetros descritos no item 4.1 desse Capítulo. Antes da inoculação das minhocas e do início da aplicação do lixiviado afluente, amostras sólidas foram analisadas em termos de micro e macronutrientes. Mais duas amostras de cada leira foram retiradas, uma na metade e outra no final do período de rega, com o objetivo de verificar a lixiviação de nutrientes e outros elementos da massa sólida para as amostras de percolados líquidos efluentes.

As análises foram realizadas nos Laboratório de Análises, do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, e no Laboratório de Tecnologia Ambientais do IPH, ambos da UFRGS.

#### 4.7. Dinâmica das minhocas

Aplicadas de acordo com o peso de substrato em cada vaso, as minhocas foram contadas e pesadas antes da inoculação. Após o término de cada período de rega, as leiras foram desmontadas e feita nova contagem e pesagem das minhocas; nesse momento, foi também realizada a contagem dos casulos (ovos).

O acompanhamento da dinâmica das minhocas durante as distintas fases da pesquisa, objetivou avaliar o desenvolvimento da minhoca nos dois diferentes tipos de substratos utilizados; a sua reação às várias taxas de aplicação de lixiviado; a comparação, nas mesmas taxas, para rega com lixiviado e com água; e o efeito da injeção de ar nas leiras.

#### 4.8. Tratamento estatístico

O tratamento estatístico adotado foi uma análise simplificada, tomando-se as médias para as diferentes leiras em cada fase e uma medida da variabilidade em relação a esta média. Para tanto foram calculadas as médias, as variâncias, os desvios padrão e os coeficientes de variação. A média ( $x_m$ ) é definida como a soma dos valores encontrados, dividido pelo número de observações. As demais variáveis são definidas a seguir (NICK e KELLNER, 1971).

##### *Variância ( $s^2$ )*

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4.2)$$

onde  $\sum$  = somatória

$s^2$  = variância

$n$  = número de observações ou de dados

$x_i$  = desvios dos valores em relação a média  $x_m$  ( $x_i - x_m$ )

##### *Desvio padrão ( $s$ )*

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (4.3)$$

onde  $s$  = desvio padrão; e os demais estão definidos acima

##### *Coefficiente de variação ( $C_v$ )*

O coeficiente de variação é definido com o desvio padrão dividido pela média, e é uma medida da variabilidade dos valores observados em relação a média. O  $C_v$  nada mais é do que o desvio padrão em porcentagem da média, sendo calculado pela equação 4.4.

$$C_v = \frac{s}{x_m} \times 100 \quad (4.4)$$

A variabilidade em relação a média foi analisada dentre das observações semanais de eficiências de redução de cargas, para a avaliar a variação ao longo do tempo em cada leira.

Outra análise foi feita tomando-se os valores médios para cada substrato sólido utilizado em cada fase da pesquisa, de modo a verificar a variabilidade da eficiência de redução de cargas para cada uma das quatro taxas de aplicação de lixiviado utilizadas em cada substrato em cada fase.

Os resultados analisados foram agrupados em função de sua variabilidade em relação a média, de acordo com o critério definido por PIMENTEL GOMES (1984), que estabelece faixas de variação conforme estabelecido na tabela 4.4.

**Tabela 4.4** – Graus de variabilidade em relação a média em função do  $C_v$

|                | Grau de variabilidade em reação a média |                   |                   |              |
|----------------|---|-------------------|-------------------|--------------|
|                | Baixa                                   | Média             | Alta              | Muito alta   |
| Valor do $C_v$ | $C_v < 10\%$                            | $10 < C_v < 20\%$ | $20 < C_v < 30\%$ | $C_v > 30\%$ |

Fonte: PIMENTEL GOMES (1984)

Para os mesmos parâmetros para os quais foi realizada a análise de eficiência de reduções de cargas, também foi realizada uma comparação em termos de concentrações efluentes das leiras com os limites de emissão de efluentes líquidos estabelecidos pelo órgão ambiental do Estado do Rio do Grande do Sul. Para cálculo da porcentagem de observações (semanas) de cada leira que atendeu ao limite de emissão, foram consideradas somente as semanas em que houve efetiva geração de percolado, desconsiderando-se aquelas em que o volume gerado foi insuficiente (VI) para a realização das análises.

## **5. RESULTADOS**

### **5.1. Caracterização físico-química dos substratos sólidos básicos utilizados**

Os resultados da caracterização dos substratos sólidos básicos, em peso seco, são apresentados na tabela A.1, tecendo-se a seguir algumas considerações. O estrume bovino apresentou pH menor do que o composto orgânico, 5,8 e 7,2 respectivamente, o que já era esperado, já que o estrume não estava completamente degradado. A relação C/N do estrume foi de 12,9, e do composto foi de 11,7. As concentrações de carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, potássio, magnésio, cobre, manganês e enxofre totais apresentaram-se maiores no estrume, confirmando assim sua vantagem em termos de macro e micronutrientes sobre o composto.

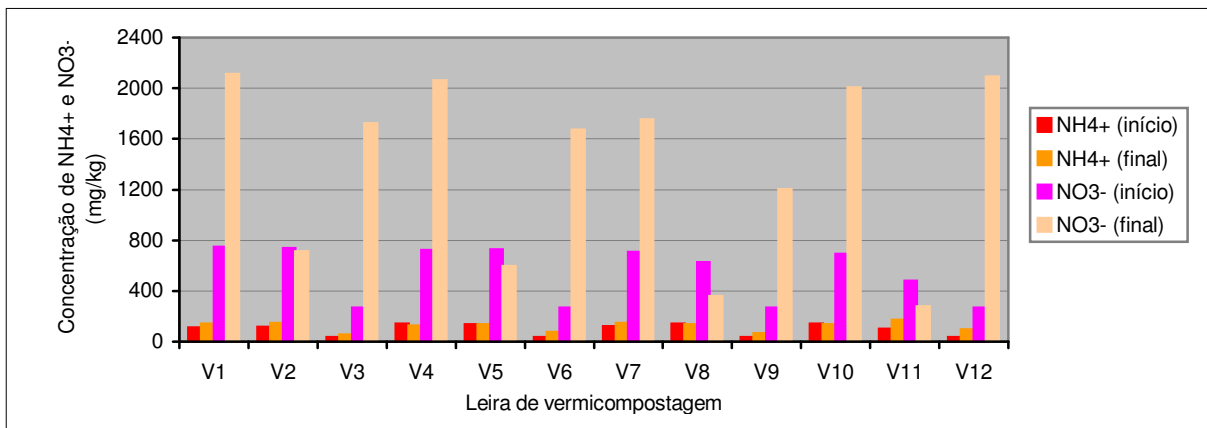
Os metais pesados chumbo, cádmio e cromo foram identicamente mais concentrados no composto, principalmente o chumbo e o cromo (de duas a três vezes maiores que no estrume). O metal pesado níquel apresentou concentrações muito próximas em ambos os substratos. As concentrações de nitrogênio amoniacal (íon amonium) e nitrogênio nitrato, mostraram-se também maiores no estrume bovino.

### **5.2. Fase 1**

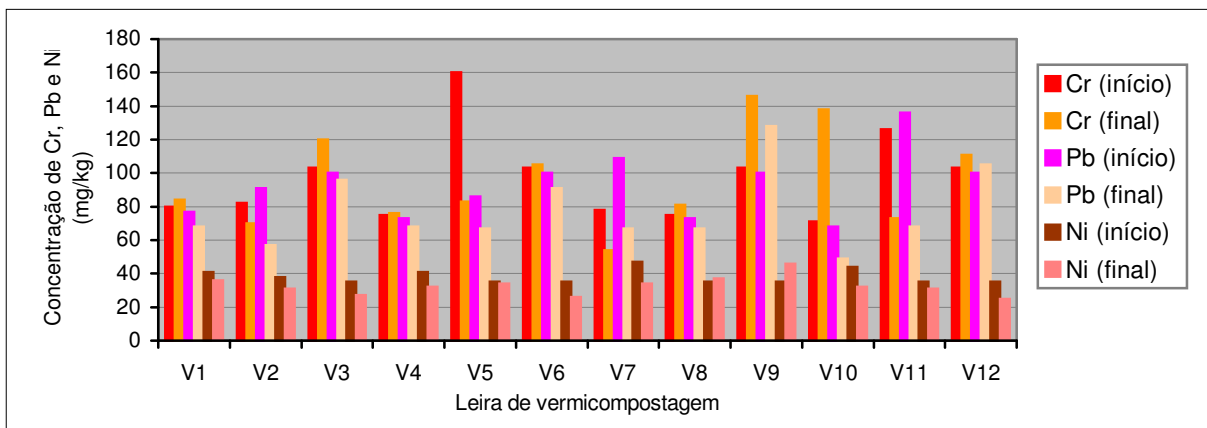
#### **5.2.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de vermicompostagem**

Nas tabelas A.2 a A.4 são apresentados o pH, e as concentrações de macro e micronutrientes e metais pesados observados nas leiras de vermicompostagem, ao longo da realização da Fase 1 de experimentação. Os aspectos mais relevantes verificados foram, do início para o final do processamento, aumento generalizado nas concentrações de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , principalmente de  $\text{NO}_3^-$  (Fig. 5.1), e redução também generalizada nas concentrações

dos metais pesados Pb, Cd e Ni. O cromo, cujo desempenho é atípico de acordo com o apresentado por POHLAND e GOULD (1986), mostrou este comportamento, reduzindo de concentração em algumas leiras e aumentando em outras; coincidentemente, as maiores concentrações ocorreram nas leiras onde o volume de líquido aplicado sobre estas era maior. O comportamento dos metais nas leiras ao longo da Fase 1 é apresentado na figura 5.2.



**Figura 5.1** – NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no substrato das leiras de vermicompostagem, ao longo da Fase 1



**Figura 5.2** – Cr, Pb e Ni no substrato das leiras de vermicompostagem, ao longo da Fase 1

### 5.2.2. Caracterização do líquido percolado das leiras, resultante da rega com água deionizada, no período anterior à aplicação do lixiviado

Como neste trabalho o termo **lixiviado** é utilizado para lixiviado de aterro sanitário (chorume), o líquido efluente pela base dos vasos será chamado de **percolado**. Na tabela A.5 são apresentados os volumes percolados e as características apresentadas pelas amostras compostas após três semanas de coleta. Verificou-se que, independentemente do volume aplicado, que neste período foi de 300 ml/d de água deionizada em cada leira, estas



mostraram comportamentos diferenciados em termos de absorção de água. Fazendo-se as médias por tipo de substrato, temos que do total de 4,5 litros de água aplicada em cada vaso, os vasos com mistura retiveram 86,4 % do total aplicado e os vasos com composto, 69,4 %.

É interessante notar que, ao se multiplicar as concentrações pelos volumes coletados, determinando a carga total percolada das leiras em termos dos parâmetros analisados, com exceção para poucas leiras, as cargas percoladas assemelharam-se. Ao mesmo tempo, essas cargas percoladas, ao serem comparadas com as aplicadas nas leiras ao início da experimentação, representaram percentuais significativamente baixos. Por exemplo, considerando-se as cargas dos macronutrientes cálcio e magnésio (somadas) em cada leira (estabelecidas a partir do produto das concentrações constantes da tabela A.2, pelos pesos de mistura apostos em cada leira) ao início da experimentação, e comparando-se esses valores com as cargas percoladas, obtém-se o resultado abaixo.

**Tabela 5.1** – Cargas de cálcio e magnésio somadas no substrato e no percolado dos vasos (g)

| Carga          | Leira  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                | V1     | V2     | V3     | V4     | V5     | V6     | V7     | V8     | V9     | V10    | V11    | V12    |
| Substrato      | 64,740 | 59,760 | 190,00 | 58,100 | 41,915 | 190,00 | 59,345 | 38,595 | 190,00 | 39,840 | 63,080 | 190,00 |
| Percolado      | 0,697  | 0,610  | 0,489  | 0,557  | 0,637  | 0,566  | 0,599  | 0,648  | 0,495  | 0,414  | 0,543  | 0,698  |
| Lixiviação (%) | 1,07   | 1,02   | 0,26   | 0,96   | 1,52   | 0,30   | 1,01   | 1,68   | 0,26   | 1,04   | 0,86   | 0,37   |

Observa-se que as cargas lixiviadas de cálcio e magnésio foram cerca de quatro vezes maior nas leiras que continham mistura como substrato do que nas leiras com composto.

### 5.2.3. Caracterização do lixiviado bruto

Na tabela A.6 são apresentadas as características do lixiviado bruto (chorume) utilizado como líquido de rega das leiras de vermicompostagem ao longo da Fase 1. Nas três incursões realizadas em tempos diferentes para se avaliar as variações ocorridas com o mesmo no período de experimentação (em que esteve armazenado), verificou-se estabilidade na concentração de DQO e excessiva variação na concentração de DBO. O nitrogênio encontrado no lixiviado, o foi praticamente na forma amoniacal; após os 60 dias de experimento, o chorume armazenado mostrou inequívocos indícios de biodegradabilidade, tendo-se encontrado alta concentração de nitratos no líquido armazenado. Pouca variação de pH foi observada (faixa neutra), incremento nas concentrações de fosfatos e de sulfatos, e relativa estabilidade em

termos de macro e micronutrientes. Em termos de metais pesados, ocorreu decréscimo nos quatro elementos observados. Os ácidos voláteis de mais fácil degradação – acético, propiônico e iso-butírico – sofreram significativas reduções.

#### **5.2.4. Resultados das análises do percolado de cada leira**

Para uma perfeita identificação das condições de cada leira nesta fase, em termos do líquido de rega utilizado (lixiviado ou água deionizada), da taxa de aplicação de líquido utilizada, e da característica do substrato que cada uma dispunha para a vermicompostagem, deve-se recorrer à tabela 4.2 do Capítulo 4.

Nas tabelas A.7 a A.12 são apresentados os resultados observados para todos os parâmetros controlados em cada leira de vermicompostagem, ao longo de toda a Fase 1. A análise em seqüência está centrada nos resultados de DQO, série nitrogênio, metais pesados e ácidos voláteis. Em função da grande variação da DBO do lixiviado bruto armazenado, conforme descrito no item 5.2.3, na Fase 1 não serão analisadas as cargas de DBO. No anexo B, são apresentadas graficamente as concentrações afluentes para cada leira.

##### **5.2.4.1. DQO**

As cargas de DQO aplicadas às leiras foram calculadas a partir da concentração do lixiviado bruto (tabela A.6), adotando-se, em função da pequena variação já referida, o valor médio de 900 mg/L como concentração afluente; esse valor, multiplicado pelo volume aplicado, forneceu a carga afluente. As cargas de DQO percoladas das leiras foram quantificadas mediante a efetivação do produto dos volumes coletados em cada semana (tabelas A.7 a A.12) pela concentração destes volumes.

Constam da tabela 5.2, os valores de DQO percolados pela base das leiras V2, V5, V8, e V11, ou seja, nas leiras que receberam somente água deionizada como líquido de rega, sendo portanto preparadas para receber o lixiviado bruto na fase seguinte (Fase 2).

Na tabela 5.3 são apresentados os valores de DQO para as leiras restantes, que receberam distintas cargas de lixiviado por semana. Além das cargas semanais aplicadas e percoladas de cada leira, a tabela apresenta também a porcentagem de redução ou remoção de carga de DQO em cada leira em cada semana, ao longo de oito semanas de experimentação.

**Tabela 5.2** – Cargas de DQO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 142            | 267            | 217            | 184            | 223            | 188            | 100            | 92             |
| V5    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 388            | 393            | 311            | 208            | 312            | 236            | 257            | 207            |
| V8    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 532            | 639            | 345            | 334            | 418            | 239            | 225            | 218            |
| V11   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 667            | 662            | 386            | 351            | 454            | 329            | 277            | 308            |

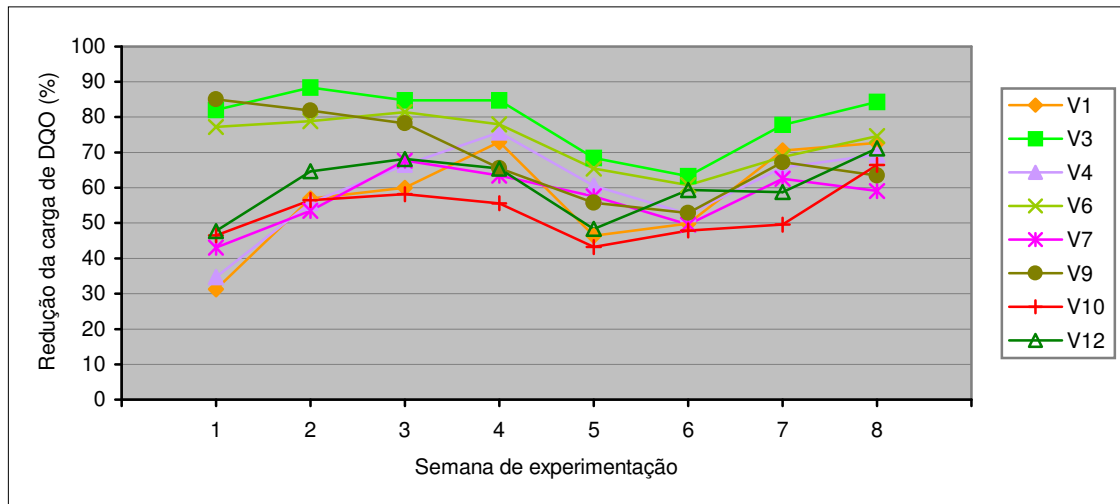
Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.3** – Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V1    | Aplicado    | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            |
|       | Percolado   | 371            | 232            | 216            | 146            | 290            | 271            | 159            | 148            |
|       | Redução (%) | 31,3           | 57,0           | 60,0           | 73,0           | 46,3           | 49,8           | 70,6           | 72,6           |
| V3    | Aplicado    | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            | 540            |
|       | Percolado   | 97             | 63             | 82             | 82             | 170            | 198            | 120            | 85             |
|       | Redução (%) | 82,0           | 88,3           | 84,8           | 84,8           | 68,5           | 63,3           | 77,8           | 84,3           |
| V4    | Aplicado    | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            |
|       | Percolado   | 546            | 371            | 281            | 203            | 330            | 397            | 287            | 257            |
|       | Redução (%) | 34,8           | 55,7           | 66,4           | 75,7           | 60,6           | 52,6           | 65,7           | 69,3           |
| V6    | Aplicado    | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            | 837            |
|       | Percolado   | 191            | 177            | 156            | 184            | 290            | 328            | 261            | 213            |
|       | Redução (%) | 77,2           | 78,9           | 81,4           | 78,0           | 65,4           | 60,8           | 68,8           | 74,6           |
| V7    | Aplicado    | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          |
|       | Percolado   | 693            | 566            | 394            | 443            | 516            | 612            | 454            | 498            |
|       | Redução (%) | 43,0           | 53,4           | 67,6           | 63,5           | 57,5           | 49,6           | 62,6           | 59,0           |
| V9    | Aplicado    | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          | 1.215          |
|       | Percolado   | 182            | 221            | 264            | 419            | 538            | 573            | 398            | 445            |
|       | Redução (%) | 85,0           | 81,8           | 78,3           | 65,5           | 55,7           | 52,8           | 67,2           | 63,4           |
| V10   | Aplicado    | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          |
|       | Percolado   | 865            | 704            | 678            | 720            | 920            | 844            | 816            | 542            |
|       | Redução (%) | 46,6           | 56,5           | 58,1           | 55,6           | 43,2           | 47,9           | 49,6           | 66,5           |
| V12   | Aplicado    | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          | 1.620          |
|       | Percolado   | 846            | 572            | 516            | 561            | 838            | 659            | 669            | 466            |
|       | Redução (%) | 47,8           | 64,7           | 68,1           | 65,4           | 48,3           | 59,3           | 58,7           | 71,2           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.3 são apresentadas as reduções percentuais em termos de carga semanal de DQO nas leiras que receberam o lixiviado como líquido de rega. Nota-se um comportamento muito similar na eficiência de redução de cargas de DQO para as oito leiras que receberam a aplicação do lixiviado durante as oito semanas do estudo. Os resultados mostram também uma vantagem claramente maior para as leiras que continham composto como substrato em relação às leiras com mistura. As reduções das cargas percoladas também foram menores para taxas de aplicação maiores do lixiviado.



**Figura 5.3** – Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 1

#### 5.2.4.2. NTK

Em função da variação ocorrida da quarta para a oitava semanas (tabela A.6), com redução significativa do nitrogênio orgânico, fixou-se como critério para o cálculo das cargas de NTK afluentes, para as quatro primeiras semanas a concentração média entre 644 e 660 mg/L, resultando o valor médio de 652 mg/L; da quinta à sétima semanas, distribuiu-se linearmente a concentração, entre os 652 mg/L médios da quarta semana e os 30 mg/L da oitava semana; esses valores, multiplicados pelo volume aplicado, definiram a carga afluente. As cargas percoladas das leiras foram quantificadas mediante a efetivação do produto dos volumes coletados em cada semana (tabelas A.7 a A.12) pela concentração destes volumes.

Na tabela 5.4 são apresentados os valores de NTK percolados nas leiras que receberam somente água deionizada como líquido de rega. As cargas resultantes, bem como a redução da carga semanal verificada em cada leira que recebeu lixiviado, estão na tabela 5.5.

**Tabela 5.4** – Cargas de NTK (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,3            | 5,0            | 1,4            | 1,6            | 2,4            | 2,1            | 1,1            | 0,4            |
| V5    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,8            | 9,8            | 0,0            | 2,2            | 2,3            | 5,3            | 2,4            | 0,9            |
| V8    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,8            | 11,9           | 3,5            | 3,2            | 3,2            | 5,2            | 3,2            | 0,9            |
| V11   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 1,5            | 9,2            | 0,0            | 3,4            | 10,7           | 15,3           | 9,8            | 1,8            |

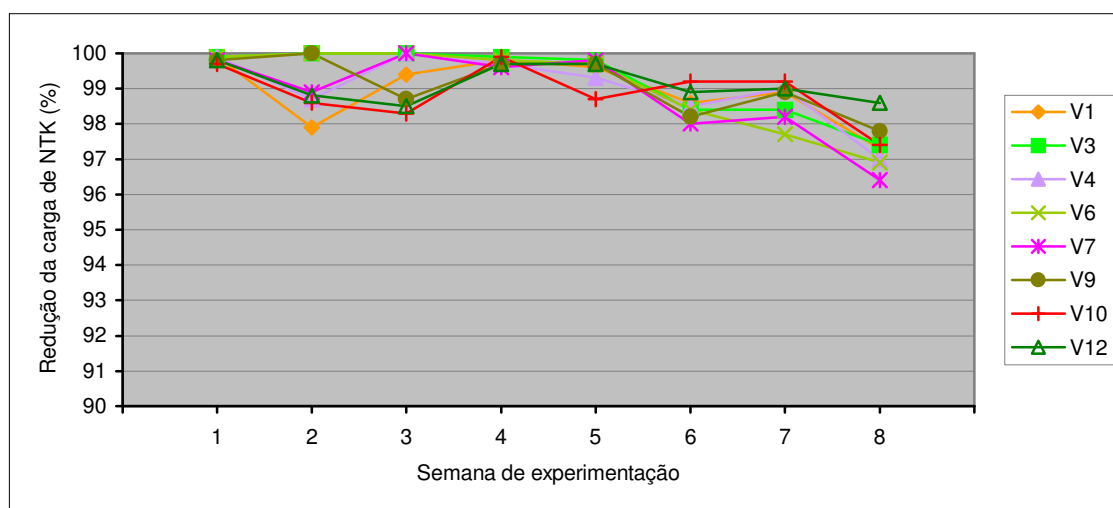
Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.5** – Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V1    | Aplicado    | 391,2          | 391,2          | 391,2          | 391,2          | 297,9 *        | 204,6 *        | 111,3 *        | 18,0           |
|       | Percolado   | 0,5            | 8,1            | 2,2            | 0,9            | 1,2            | 2,9            | 1,2            | 0,5            |
|       | Redução (%) | 99,9           | 97,9           | 99,4           | 99,8           | 99,6           | 98,6           | 98,9           | 97,3           |
| V3    | Aplicado    | 391,2          | 391,2          | 391,2          | 391,2          | 297,9 *        | 204,6 *        | 111,3 *        | 18,0           |
|       | Percolado   | 0,5            | 0,0            | 0,0            | 0,4            | 0,6            | 3,3            | 1,8            | 0,5            |
|       | Redução (%) | 99,9           | 100            | 100            | 99,9           | 99,8           | 98,4           | 98,4           | 97,4           |
| V4    | Aplicado    | 606,4          | 606,4          | 606,4          | 606,4          | 461,8 *        | 317,1 *        | 172,5 *        | 27,9           |
|       | Percolado   | 0,9            | 7,6            | 0,0            | 1,7            | 3,1            | 4,7            | 1,7            | 0,8            |
|       | Redução (%) | 99,9           | 98,7           | 100            | 99,7           | 99,3           | 98,5           | 99,0           | 97,0           |
| V6    | Aplicado    | 606,4          | 606,4          | 606,4          | 606,4          | 461,8 *        | 317,1 *        | 172,5 *        | 27,9           |
|       | Percolado   | 0,6            | 0,0            | 0,0            | 1,3            | 1,5            | 5,0            | 3,9            | 0,9            |
|       | Redução (%) | 99,9           | 100            | 100            | 99,8           | 99,7           | 98,4           | 97,7           | 96,9           |
| V7    | Aplicado    | 880,2          | 880,2          | 880,2          | 880,2          | 670,3 *        | 460,4 *        | 250,4 *        | 40,5           |
|       | Percolado   | 1,4            | 9,9            | 0,0            | 3,3            | 1,3            | 9,3            | 4,5            | 1,5            |
|       | Redução(%)  | 99,8           | 98,9           | 100            | 99,6           | 99,8           | 98,0           | 98,2           | 96,4           |
| V9    | Aplicado    | 880,2          | 880,2          | 880,2          | 880,2          | 670,3 *        | 460,4 *        | 250,4 *        | 40,5           |
|       | Percolado   | 1,3            | 0,0            | 11,5           | 2,9            | 2,2            | 8,5            | 2,7            | 0,9            |
|       | Redução (%) | 99,8           | 100            | 98,7           | 99,7           | 99,7           | 98,2           | 98,9           | 97,8           |
| V10   | Aplicado    | 1.173,6        | 1.173,6        | 1.173,6        | 1.173,6        | 893,7 *        | 613,8 *        | 333,9 *        | 54,0           |
|       | Percolado   | 2,9            | 16,7           | 20,5           | 1,7            | 11,4           | 5,0            | 2,7            | 1,4            |
|       | Redução (%) | 99,7           | 98,6           | 98,3           | 99,9           | 98,7           | 99,2           | 99,2           | 97,4           |
| V12   | Aplicado    | 1.173,6        | 1.173,6        | 1.173,6        | 1.173,6        | 893,7 *        | 613,8 *        | 333,9 *        | 54,0           |
|       | Percolado   | 2,4            | 13,9           | 17,7           | 3,7            | 2,8            | 6,9            | 3,2            | 0,8            |
|       | Redução (%) | 99,8           | 98,8           | 98,5           | 99,7           | 99,7           | 98,9           | 99,0           | 98,6           |

\* Valores estimados por interpolação linear

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Figura 5.4** – Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 1

O lixiviado utilizado para rega nesta fase apresentava altas concentrações de NTK, na ordem de 900 mg/L, no entanto todas as leiras apresentaram excelente remoção para o nitrogênio total, sempre acima de 96 %, verificando-se uma pequena perda de eficiência

desta remoção nas últimas semanas da experimentação.

### 5.2.4.3. $\text{NO}_3^-$

No caso das cargas de  $\text{NO}_3^-$ , também a inexistência de dados entre a primeira e a quarta semanas (com redução de concentração), e entre esta e a oitava semanas, impuseram a distribuição linear como forma de estimativa de valores de concentrações. A partir daí, os critérios de cálculo foram os mesmos já referidos para DQO e NTK. Nas tabelas 5.6 e 5.7 são apresentadas as cargas de nitrato aplicadas e percoladas para Fase 1.

**Tabela 5.6** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 200            | 473            | 318            | 426            | 571            | 755            | 492            | 263            |
| V5    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 1046           | 885            | 531            | 473            | 993            | 842            | 780            | 377            |
| V8    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 1679           | 1094           | 706            | 818            | 1346           | 1068           | 690            | 359            |
| V11   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 1972           | 1171           | 862            | 925            | 2477           | 1143           | 740            | 1673           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

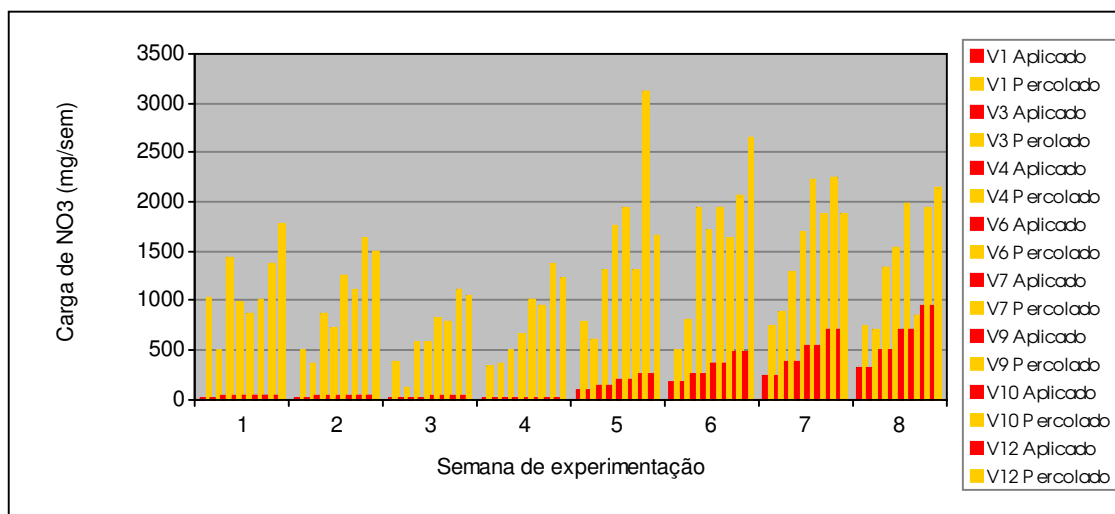
**Tabela 5.7** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V1    | Aplicado  | 9,6            | 7,4 *          | 5,2 *          | 3,1            | 79,9 *         | 156,6 *        | 233,4 *        | 310,2          |
|       | Percolado | 1.006          | 491            | 364            | 334            | 768            | 480            | 725            | 736            |
| V3    | Aplicado  | 9,6            | 7,4 *          | 5,2 *          | 3,1            | 79,9 *         | 156,6 *        | 233,4 *        | 310,2          |
|       | Percolado | 487            | 352            | 93             | 340            | 590            | 798            | 877            | 694            |
| V4    | Aplicado  | 14,9           | 11,5 *         | 8,1 *          | 4,8            | 123,8 *        | 242,7 *        | 361,8 *        | 480,81         |
|       | Percolado | 1.430          | 856            | 559            | 492            | 1.303          | 1.935          | 1.286          | 1.324          |
| V6    | Aplicado  | 14,9           | 11,5 *         | 8,1 *          | 4,8            | 123,8 *        | 242,7 *        | 361,8 *        | 480,81         |
|       | Percolado | 984            | 720            | 567            | 641            | 1.750          | 1.708          | 1.677          | 1.524          |
| V7    | Aplicado  | 21,6           | 16,6 *         | 11,7 *         | 6,9            | 179,8 *        | 352,4 *        | 525,2 *        | 697,9          |
|       | Percolado | 862            | 1245           | 803            | 996            | 1.928          | 1.931          | 2.208          | 1.965          |
| V9    | Aplicado  | 21,6           | 16,6 *         | 11,7 *         | 6,9            | 179,8 *        | 352,4 *        | 525,2 *        | 697,9          |
|       | Percolado | 1.002          | 1.094          | 773            | 939            | 1.303          | 1.620          | 1.863          | 836            |
| V10   | Aplicado  | 28,8           | 22,3 *         | 15,7 *         | 9,2            | 239,6 *        | 469,9 *        | 700,2 *        | 930,6          |
|       | Percolado | 1.362          | 1.618          | 1.100          | 1.367          | 3.111          | 2.048          | 2.235          | 1.926          |
| V12   | Aplicado  | 28,8           | 22,3 *         | 15,7 *         | 9,2            | 239,6 *        | 469,9 *        | 700,2 *        | 930,6          |
|       | Percolado | 1.763          | 1.486          | 1.040          | 1.227          | 1.642          | 2.647          | 1.877          | 2.123          |

\* Valores estimados por interpolação linear

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.5 são apresentadas as cargas de nitrato que foram aplicadas e as que percolaram nas oito leiras que receberam o lixiviado como líquido de rega.



**Figura 5.5** – Cargas de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aplicadas e percoladas nas leiras da Fase 1

Na figura acima, pode-se ver que a partir da quinta semana de experimentação, houve um aumento da carga aplicada de nitrato. Isto é resultante da nitrificação sofrida pelo lixiviado armazenado ao longo da Fase 1, conforme pode ser visto na tabela A.6 do anexo A. Notadamente, os vasos com maior taxa de aplicação de lixiviado tiveram maiores cargas de nitrato percoladas.

#### 5.2.4.4. Metais pesados

As cargas de metais pesados afluentes e percolados das leiras ao longo da experimentação, foram estabelecidas de acordo com os critérios já referidos para DQO, NTK e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. No entanto, a inexistência de resultados em termos de metais do lixiviado afluente para as três primeiras semanas, restringiu os cálculos de eficiência na remoção de metais, para as observações realizadas entre a quarta e a oitava semanas, inclusive.

Os resultados para metais pesados são os constantes das tabelas 5.8 e 5.9 seguintes. As cargas foram estabelecidas para a soma dos metais Pb, Ni, Cd e Cr. As concentrações dos metais pesados analisados nos efluentes, constam nas figuras B.16, B.21, B.25 e B.29 do Anexo B.

**Tabela 5.8** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | –              | 0,043          | 0,020          | 0,037          | 0,00           | 0,051          | 0,034          | 0,006          |
| V5    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,072          | 0,109          | 0,025          | 0,029          | 0,046          | 0,125          | 0,068          | 0,00           |
| V8    | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,086          | 0,146          | 0,040          | 0,112          | 0,029          | 0,148          | 0,066          | 0,017          |
| V11   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Percolado | 0,135          | 0,186          | 0,066          | 0,094          | 0,067          | 0,164          | 0,134          | 0,063          |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.9** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V1    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,142          | 0,127 *        | 0,111 *        | 0,096 *        | 0,080          |
|       | Percolado   | –              | 0,032          | 0,024          | 0,032          | 0,025          | 0,076          | 0,048          | 0,035          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 77,5           | 80,3           | 31,5           | 50,0           | 56,3           |
| V3    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,142          | 0,127 *        | 0,111 *        | 0,096 *        | 0,080          |
|       | Percolado   | –              | 0,034          | 0,016          | 0,035          | 0,019          | 0,084          | 0,050          | 0,017          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 75,4           | 85,0           | 24,3           | 47,9           | 78,8           |
| V4    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,220          | 0,197 *        | 0,172 *        | 0,149 *        | 0,124          |
|       | Percolado   | 0,0116         | 0,106          | 0,068          | 0,036          | 0,045          | 0,135          | 0,064          | 0,045          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 83,6           | 77,2           | 21,5           | 57,0           | 63,7           |
| V6    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,220          | 0,197 *        | 0,172 *        | 0,149 *        | 0,124          |
|       | Percolado   | –              | 0,079          | 0,045          | 0,039          | 0,083          | 0,128          | 0,065          | 0,044          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 82,3           | 57,9           | 25,6           | 56,4           | 64,5           |
| V7    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,320          | 0,285 *        | 0,250 *        | 0,215 *        | 0,180          |
|       | Percolado   | 0,149          | 0,143          | 0,121          | 0,129          | 0,039          | 0,142          | 0,103          | 0,039          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 59,7           | 86,3           | 43,2           | 52,1           | 78,3           |
| V9    | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,320          | 0,285 *        | 0,250 *        | 0,215 *        | 0,180          |
|       | Percolado   | 0,171          | 0,127          | 0,111          | 0,106          | 0,093          | 0,160          | 0,094          | 0,053          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 66,9           | 67,4           | 36,0           | 56,3           | 70,6           |
| V10   | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,426          | 0,381 *        | 0,333 *        | 0,288 *        | 0,240          |
|       | Percolado   | 0,195          | 0,182          | 0,104          | 0,152          | 0,132          | 0,228          | 0,102          | 0,055          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 64,3           | 65,4           | 31,5           | 64,6           | 77,1           |
| V12   | Aplicado    | –              | –              | –              | 0,426          | 0,381 *        | 0,333 *        | 0,288 *        | 0,240          |
|       | Percolado   | 0,198          | 0,176          | 0,173          | 0,109          | 0,176          | –              | 0,121          | 0,046          |
|       | Redução (%) |                |                |                | 74,4           | 53,8           | –              | 58,0           | 80,8           |

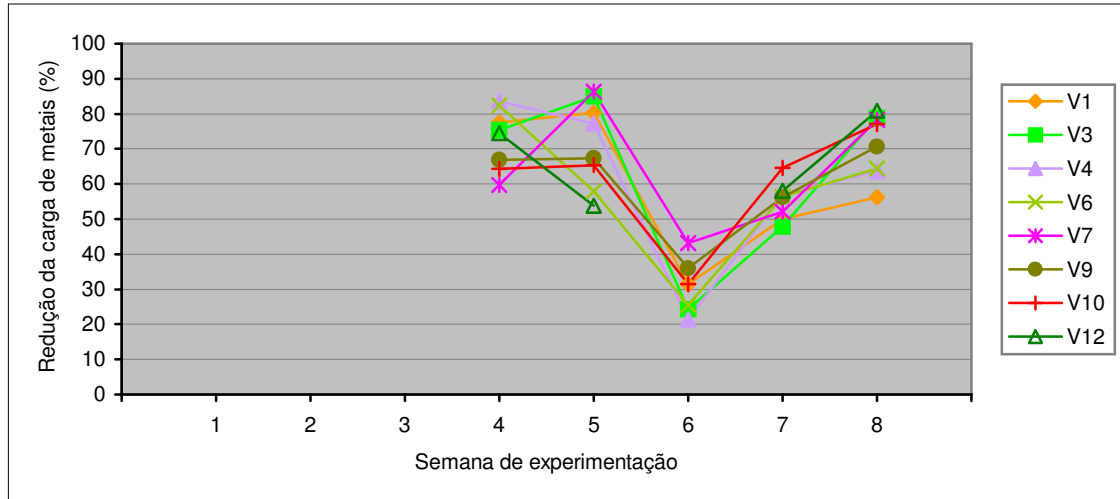
\* Valores estimados por interpolação linear

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.6 são apresentadas as reduções percentuais de cargas percoladas em relação às cargas aplicadas. Todas as leiras apresentaram comportamento muito parecidos nas semanas de observação. As reduções ficaram entre 90 e 20 %, com uma acentuada perda



de eficiência na sexta semana. Como os resultados das concentrações da sexta semana não se diferenciaram das demais, atribui-se esta menor eficiência devido ao volume maior percolado, em todas as leiras nesta semana, como mostra a figura B.1.



**Figura 5.6** – Redução de cargas de metais pesados do lixiviado na Fase 1

#### 5.2.4.5. Ácidos voláteis

As cargas de ácidos voláteis afluentes e percolados das leiras ao longo da experimentação, foram estabelecidas de acordo com os critérios já anteriormente apresentados. Assim como para os metais, a inexistência de resultados para as três primeiras semanas, restringiu os cálculos para as observações realizadas entre a quarta e a oitava semanas, inclusive. Os resultados são os constantes das tabelas 5.10 e 5.11. As cargas foram estabelecidas para as somas das cargas individuais de cada ácido volátil analisado.

**Tabela 5.10** – Cargas de ácidos voláteis (acético + propiônico + butírico + iso-butírico + valérico + iso-valérico) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana |      |       |      |      |      |      |      |
|-------|-----------|--------|------|-------|------|------|------|------|------|
|       |           | 1ª     | 2ª   | 3ª    | 4ª   | 5ª   | 6ª   | 7ª   | 8ª   |
| V2    | Aplicado  | 0      | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|       | Percolado | 0,47   | 2,07 | 1,64  | 1,05 | 2,43 | 1,53 | 1,00 | 0,45 |
| V5    | Aplicado  | 0      | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|       | Percolado | 1,49   | 2,48 | 1,36  | 1,72 | 1,72 | 1,94 | 1,93 | 2,46 |
| V8    | Aplicado  | 0      | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|       | Percolado | 0,91   | 4,53 | 10,10 | 2,31 | 1,73 | 2,00 | 1,62 | 2,23 |
| V11   | Aplicado  | 0      | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|       | Percolado | 2,72   | 5,56 | 6,40  | 3,14 | 3,98 | 6,53 | 2,17 | 2,59 |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

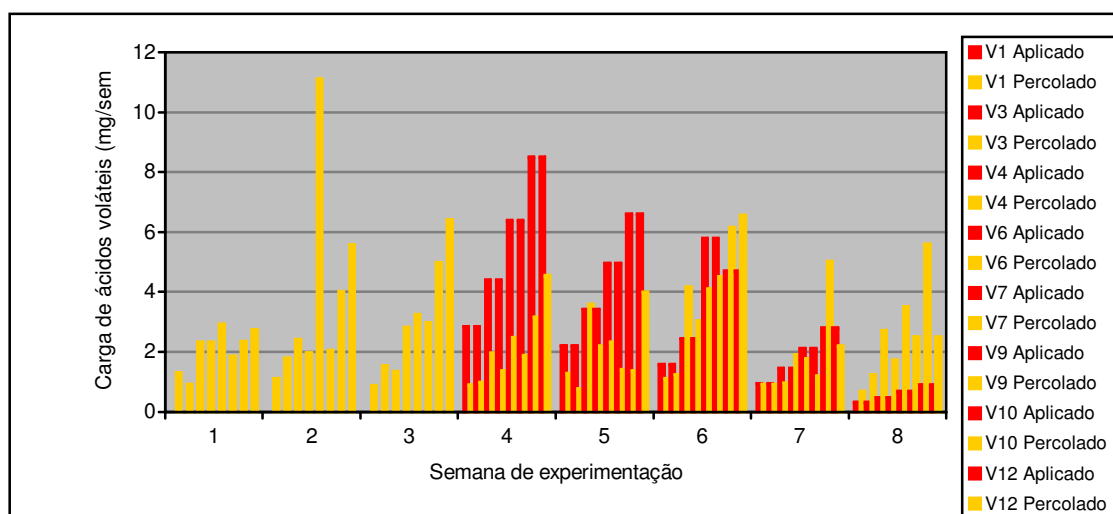
**Tabela 5.11** – Cargas de ácidos voláteis (acético + propiônico + butírico + iso-butírico + valérico + iso-valérico) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 1

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V1    | Aplicado  | –              | –              | –              | 2,83           | 2,19 *         | 1,56 *         | 0,93 *         | 0,29           |
|       | Percolado | 1,29           | 1,08           | 0,85           | 0,87           | 1,27           | 1,10           | 0,90           | 0,67           |
| V3    | Aplicado  | –              | –              | –              | 2,83           | 2,19 *         | 1,56 *         | 0,93 *         | 0,29           |
|       | Percolado | 0,90           | 1,78           | 1,51           | 0,96           | 0,75           | 1,22           | 0,90           | 1,21           |
| V4    | Aplicado  | –              | –              | –              | 4,38           | 3,40 *         | 2,42 *         | 1,44 *         | 0,46           |
|       | Percolado | 2,30           | 2,40           | 1,33           | 1,94           | 3,58           | 4,15           | 0,95           | 2,70           |
| V6    | Aplicado  | –              | –              | –              | 4,38           | 3,40 *         | 2,42 *         | 1,44 *         | 0,46           |
|       | Percolado | 2,31           | 1,95           | 2,79           | 1,35           | 2,17           | 3,02           | 1,89           | 1,71           |
| V7    | Aplicado  | –              | –              | –              | 6,36           | 4,93 *         | 5,76 *         | 2,09 *         | 0,66           |
|       | Percolado | 2,90           | 11,09          | 3,22           | 2,45           | 2,30           | 4,09           | 1,75           | 3,49           |
| V9    | Aplicado  | –              | –              | –              | 6,36           | 4,93 *         | 5,76 *         | 2,09 *         | 0,66           |
|       | Percolado | 1,83           | 2,03           | 2,95           | 1,85           | 1,38           | 4,49           | 1,18           | 2,48           |
| V10   | Aplicado  | –              | –              | –              | 8,48           | 6,58 *         | 4,68 *         | 2,78 *         | 0,88           |
|       | Percolado | 2,32           | 4,00           | 4,96           | 3,15           | 1,35           | 6,13           | 5,01           | 5,58           |
| V12   | Aplicado  | –              | –              | –              | 8,48           | 6,58 *         | 4,68 *         | 2,78 *         | 0,88           |
|       | Percolado | 2,72           | 5,56           | 6,40           | 4,53           | 3,98           | 6,53           | 2,17           | 2,47           |

\* Valores estimados por interpolação linear

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

As cargas de ácidos voláteis aplicadas e percoladas estão apresentadas na figura 5.7. As cargas aplicadas foram diminuindo da quarta para a oitava semana. Como os volumes aplicados em cada leira foram constantes ao longo de cada fase da pesquisa, assim como no caso do NTK, evidencia-se que ocorreu uma degradação do lixiviado, sob refrigeração, ao longo do armazenamento de oito semanas. Com exceção da leira V7, na semana 2, as cargas de ácidos voláteis percoladas foram muito similares em todas as leiras ao longo desta fase.



**Figura 5.7** – Cargas de ácidos voláteis aplicadas e percoladas na Fase 1

### 5.3. Fase 2

Nesta etapa, foram utilizados os mesmos substratos usados para o desenvolvimento da Fase 1, razão pela qual não consta do Anexo A a sua caracterização. Conforme já foi referido, estas leiras, cujo substrato sólido era a mistura do composto orgânico e estrume bovino na Fase 1, tiveram este material vermicompostado com aplicação de água deionizada nas mesmas taxas do lixiviado. Nesta Fase 2, então, o objetivo foi, retiradas as minhocas que processaram o material anteriormente, verificar a eficiência somente do húmus (sem a presença dos vermes) na atenuação/remoção das características tóxicas do lixiviado que foi aplicado sobre as leiras.

#### 5.3.1. Caracterização do lixiviado bruto

Na tabela A.13 são apresentadas as características do lixiviado bruto utilizado como líquido de rega das leiras (sem minhocas) ao longo da Fase 2. Nesta etapa, o lixiviado foi renovado e controlado quinzenalmente. Independentemente da busca de lixiviado novo a cada duas semanas, verificou-se no mesmo relativa estabilidade nas concentrações de DQO e macro e micronutrientes. O nitrogênio apresentou valores praticamente idênticos para NTK e  $\text{NH}_4^+$ , o que ratifica o material como efluente de degradação anaeróbia, com baixas concentrações de nitratos. O pH situou-se em uma faixa levemente alcalina. Os metais pesados apresentaram concentrações iguais ou menores que 0,09 mg/L, e principalmente menores; ácidos voláteis, à exceção do acético, não foram detectados.

#### 5.3.2. Resultados das análises do percolado de cada leira

As quatro leiras estudadas, com o volume de líquido (lixiviado) que receberam diariamente, 6 dias por semana, estão identificadas no quadro seguinte.

**Tabela 5.12** – Características intrínsecas a cada leira de vermicomposto (mistura como substrato)

| Leira | Taxa de aplicação de lixiviado (ml/d) |
|-------|---------------------------------------|
| V2    | 100                                   |
| V5    | 155                                   |
| V8    | 225                                   |
| V11   | 300                                   |

Nas tabelas A.14 a A.17 são apresentados os resultados observados para todos os parâmetros controlados em cada leira, ao longo da Fase 2, que teve a duração de 10 semanas. A tendência observada foi similar a da Fase 1; assim, é possível inferir-se que o efeito atenuador é conferido pelo húmus, e não pelas minhocas, ou indiretamente por estas. Esta questão será discutida no capítulo seguinte.

### 5.3.2.1. DQO

As cargas de DQO aplicadas são o produto dos volumes semanais aplicados pela concentração do lixiviado bruto de cada semana. Em função da degradação sofrida pelo lixiviado armazenado na Fase 1, na Fase 2 o lixiviado foi renovado quinzenalmente e analisado semanalmente. Os resultados da caracterização do lixiviado bruto estão na tabela A.13. As cargas de DQO percoladas das leiras foram quantificadas mediante a efetivação do produto dos volumes coletados em cada semana (tabelas A.14 a A.17) pela concentração destes volumes. As cargas aplicadas e percoladas estão tabela 5.13. A mesma tabela também apresenta as reduções percentuais de DQO.

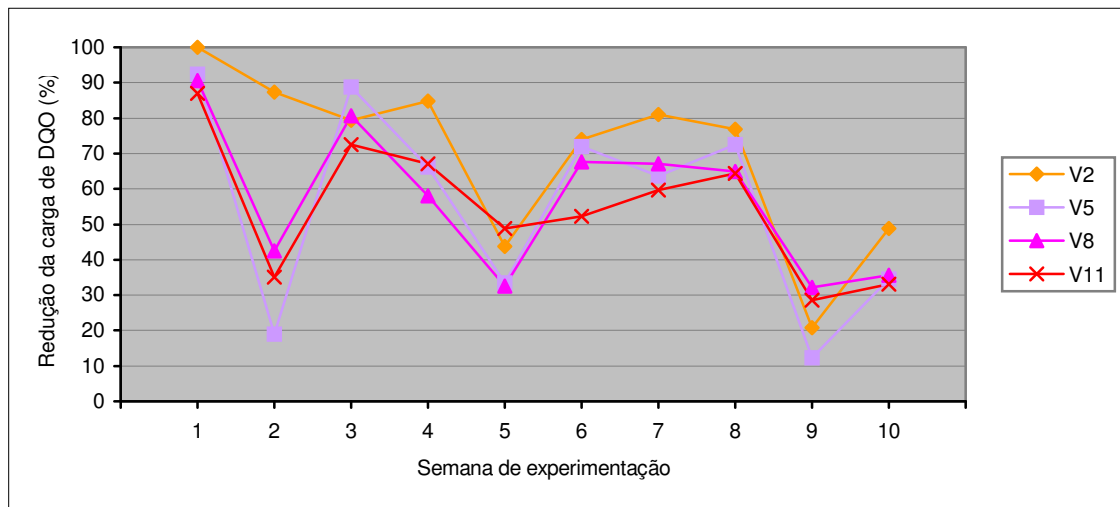
**Tabela 5.13** – Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado    | 1.038          | 468            | 1.296          | 972            | 990            | 690            | 768            | 720            | 576            | 492             |
|       | Percolado   | 0              | 59             | 268            | 148            | 556            | 180            | 145            | 167            | 456            | 252             |
|       | Redução (%) | 100            | 87,4           | 79,3           | 84,8           | 43,8           | 73,9           | 81,1           | 76,8           | 20,8           | 48,8            |
| V5    | Aplicado    | 1.609          | 725            | 2.009          | 1.507          | 1.535          | 1.070          | 1.190          | 1.116          | 893            | 763             |
|       | Percolado   | 122            | 587            | 228            | 511            | 1.022          | 301            | 433            | 307            | 783            | 500             |
|       | Redução (%) | 92,4           | 19,0           | 88,7           | 66,1           | 33,4           | 71,9           | 63,6           | 72,5           | 12,3           | 34,5            |
| V8    | Aplicado    | 2.336          | 1.053          | 2.916          | 2.187          | 2.228          | 1.553          | 1.728          | 1.620          | 1.296          | 1.107           |
|       | Percolado   | 220            | 606            | 564            | 918            | 1.502          | 501            | 571            | 567            | 880            | 712             |
|       | Redução (%) | 90,6           | 42,5           | 80,7           | 58,0           | 32,6           | 67,7           | 67,0           | 65,0           | 32,1           | 35,7            |
| V11   | Aplicado    | 3.114          | 1.404          | 3.888          | 2.916          | 2.970          | 2.070          | 2.304          | 2.160          | 1.728          | 1.476           |
|       | Percolado   | 406            | 913            | 1.064          | 961            | 1.521          | 988            | 928            | 770            | 1.234          | 987             |
|       | Redução (%) | 87,0           | 35,0           | 72,6           | 67,0           | 48,8           | 52,3           | 59,7           | 64,4           | 28,6           | 33,1            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.8 é apresentado graficamente a eficiência de remoção percentual de DQO na Fase 2. Houve grande variação na eficiência de remoção de DQO ao longo das 10 semanas de experimentação, de 10 a 90 %. As maiores quedas de redução nas cargas percoladas ocorreram nas semanas 2, 5 e 9. Isto pode ser explicado pelo aumento na concentração do percolado efluente (Fig. B.6) aliado a volumes maiores percolados nestas semanas (Fig. B.2). Na semana 1, embora as concentrações sejam ainda maiores que nas outras três semanas,

como o volume percolado foi muito pequeno, a eficiência de remoção foi a maior entre todas as semanas.



**Figura 5.8** – Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 2

### 5.3.2.2. DBO

O procedimento de cálculo das cargas de DBO foram idênticos aos utilizados na DQO. As cargas aplicadas e percoladas estão tabela 5.14. A mesma tabela também apresenta as reduções percentuais de DQO.

**Tabela 5.14** – Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2

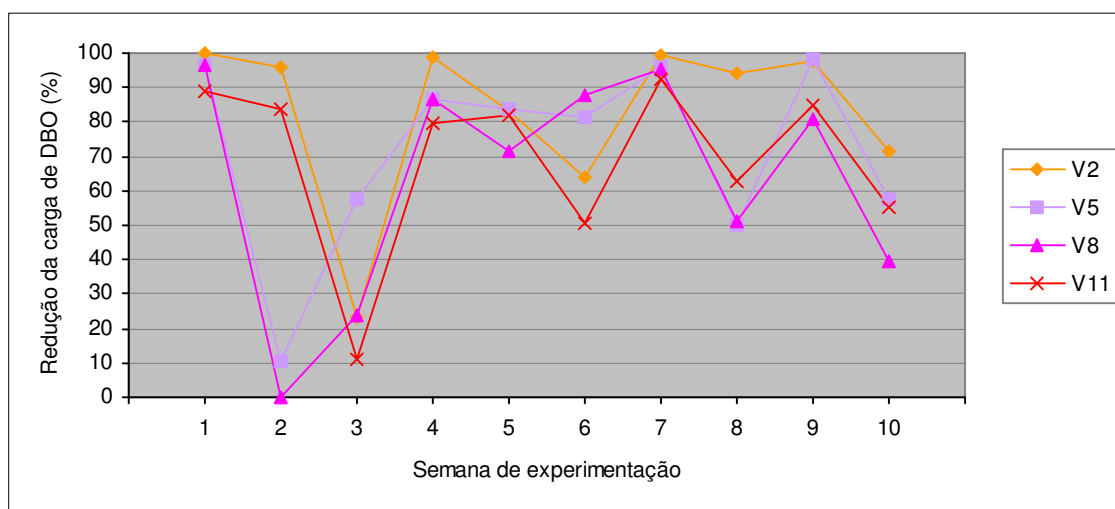
| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado    | 672            | 95             | 168            | 759            | 212            | 100            | 594            | 18             | 348            | 53              |
|       | Percolado   | 0              | 4              | 129            | 9              | 36             | 36             | 4              | 1              | 8              | 15              |
|       | Redução (%) | 100            | 95,8           | 23,2           | 98,8           | 83,0           | 64,0           | 99,3           | 94,4           | 97,7           | 71,7            |
| V5    | Aplicado    | 1.042          | 147            | 260            | 1.176          | 329            | 155            | 921            | 28             | 539            | 82              |
|       | Percolado   | 38             | 132            | 110            | 155            | 53             | 29             | 39             | 14             | 8              | 35              |
|       | Redução (%) | 96,4           | 10,2           | 57,7           | 86,8           | 83,9           | 81,3           | 95,8           | 50,0           | 98,5           | 57,3            |
| V8    | Aplicado    | 1.512          | 214            | 378            | 1.708          | 477            | 225            | 1.337          | 41             | 783            | 119             |
|       | Percolado   | 55             | 260            | 287            | 226            | 135            | 27             | 61             | 20             | 148            | 72              |
|       | Redução (%) | 96,4           | 0              | 24,1           | 86,8           | 71,7           | 88,0           | 95,4           | 51,2           | 81,1           | 39,5            |
| V11   | Aplicado    | 2.016          | 285            | 504            | 2.277          | 636            | 300            | 1.782          | 54             | 1.044          | 159             |
|       | Perolado    | 222            | 46             | 449            | 464            | 115            | 149            | 136            | 20             | 159            | 71              |
|       | Redução (%) | 89,0           | 83,9           | 10,9           | 79,6           | 81,9           | 50,3           | 92,4           | 63,0           | 84,8           | 55,3            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.9 é apresentado graficamente a eficiência de remoção percentual de DBO na Fase 2. As variações na eficiência de remoção de DBO foram ainda maiores do que no caso da DQO. Embora a eficiência tenha ficado acima de 50 % na maioria das vezes, nas semanas 2 e 3, verificou-se uma queda muito grande. Para entender este fato, deve-se analisar

conjuntamente as figuras 5.9, B.2 e B.10, e a tabela A.13. Nas semanas em questão, houve um volume de percolado efluente gerado semelhante aos volumes da semana 4, apresentando este percolado concentrações de DBO semelhantes nas primeiras quatro semanas da Fase 2.

A menor eficiência de remoção de DBO nas semanas 2 e 3 é portanto, função de uma menor concentração deste parâmetro no lixiviado bruto afluente nestas semanas, especificamente se comparada com as semanas 1 e 4 (Tab. A.13).



**Figura 5.9** – Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 2

### 5.3.2.3. NTK

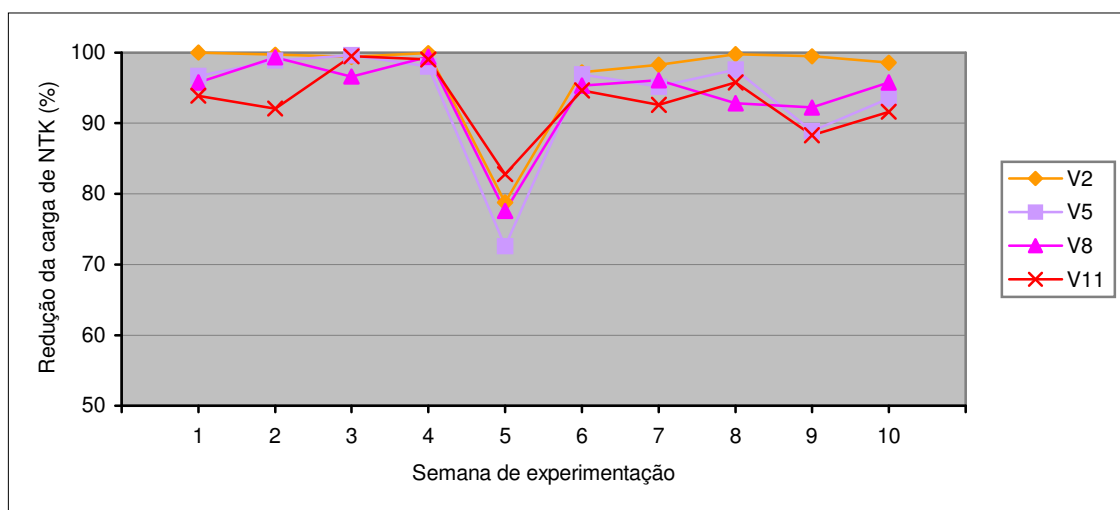
As cargas de NTK da Fase 2, foram determinadas com base nos resultados constantes nas tabelas A.13 a A.17 e na figura B.2. Os resultados em termos de carga de NTK aplicada e percolada estão apresentadas na tabela 5.15.

**Tabela 5.15** – Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado    | 648            | 654            | 735            | 714            | 622            | 594            | 516            | 479            | 353            | 361             |
|       | Percolado   | 0,0            | 1,7            | 4,3            | 0,8            | 131,6          | 16,6           | 9,0            | 0,9            | 1,8            | 4,9             |
|       | Redução (%) | 100            | 99,7           | 99,4           | 99,9           | 78,8           | 97,2           | 98,3           | 99,8           | 99,5           | 98,6            |
| V5    | Aplicado    | 1.004          | 1.014          | 1.139          | 1.107          | 964            | 921            | 800            | 742            | 547            | 560             |
|       | Percolado   | 33,5           | 11,6           | 4,9            | 21,8           | 264,2          | 28,5           | 38,5           | 18,1           | 60,9           | 36,4            |
|       | Redução (%) | 96,7           | 98,9           | 99,6           | 98,0           | 72,6           | 96,9           | 95,2           | 97,6           | 88,9           | 93,5            |
| V8    | Aplicado    | 1.458          | 1.472          | 1.654          | 1.607          | 1.399          | 1.337          | 1.161          | 1.077          | 794            | 813             |
|       | Percolado   | 61,8           | 9,9            | 5,6            | 9,0            | 313,6          | 63,4           | 44,7           | 78,0           | 61,7           | 34,5            |
|       | Redução (%) | 95,8           | 99,3           | 96,6           | 99,4           | 77,6           | 95,3           | 96,1           | 92,8           | 92,2           | 95,8            |
| V11   | Aplicado    | 1.944          | 1.962          | 2.205          | 2.142          | 1.865          | 1.782          | 1.548          | 1.436          | 1.058          | 1.084           |
|       | Percolado   | 118,4          | 154,5          | 10,7           | 21,8           | 321,1          | 97,2           | 114,6          | 59,8           | 123,4          | 90,7            |
|       | Redução (%) | 93,9           | 92,1           | 99,5           | 99,0           | 82,8           | 94,6           | 92,6           | 95,8           | 88,3           | 91,6            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.10 são apresentadas as eficiências de redução percentual ao longo das dez semanas desta fase. Com exceção da semana 5, todas as leiras apresentaram redução superior a 88 % nas cargas percoladas, em termos de NTK. O resultado, totalmente atípico da semana 5, foi verificado em todas as quatro leiras da Fase 2, não podendo, portanto, ser interpretado como sendo erro de amostragem ou de análise. Esta variação pode ser explicada pelo fato de ter ocorrido uma diminuição do volume percolado na semana anterior, possivelmente por entupimento ou colmatação da drenagem da base dos vasos. No momento da desobstrução, juntamente com o percolado houve a saída de material suspenso no líquido, carreando nitrogênio não nitrificado.



**Figura 5.10** – Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 2

#### 5.3.2.4. $\text{NO}_3^-$

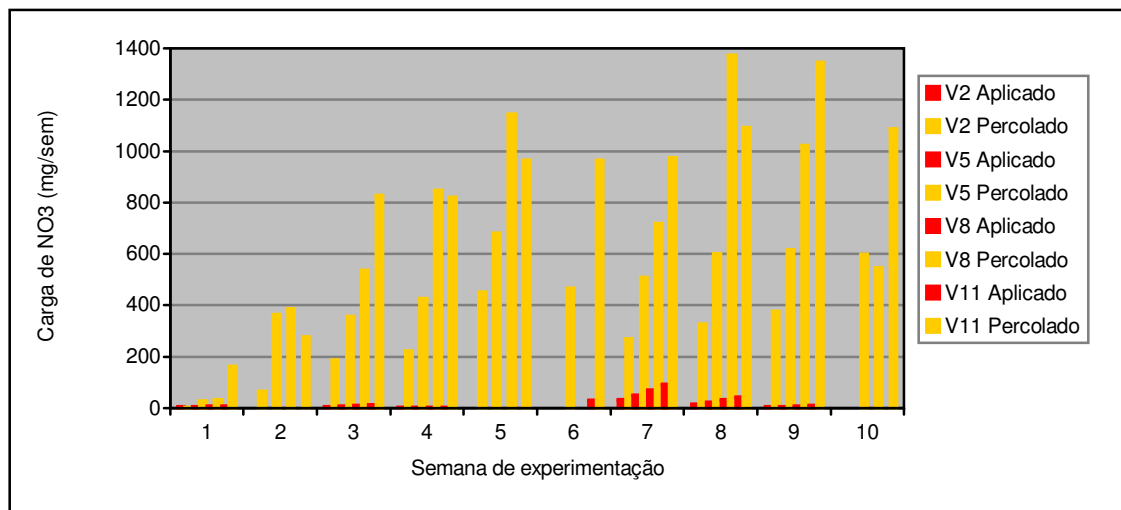
As cargas de nitrato foram calculadas da mesma forma que para os demais parâmetros, sendo os resultados apresentados na tabela 5.16. As lacunas desta tabela são função de problemas na coleta e análise das amostras, não estando os resultados disponíveis. Neste caso, como o lixiviado afluente foi renovado semanalmente, diferentemente da Fase 1, não foi utilizada interpolação linear.

**Tabela 5.16** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 2

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado  | 2,0            | –              | 3,0            | 0,1            | –              | –              | 30,0           | 12,9           | 2,4            | –               |
|       | Percolado | 0,0            | 62,2           | 184,7          | 220,0          | 448,3          | –              | 266,0          | 324,5          | 374,7          | –               |
| V5    | Aplicado  | 3,1            | –              | 4,7            | 0,1            | –              | –              | 46,5           | 20,0           | 3,7            | –               |
|       | Percolado | 23,8           | 361,4          | 353,8          | 423,6          | 677,3          | 463,5          | 506,8          | 598,0          | 611,6          | 594,3           |
| V8    | Aplicado  | 4,5            | –              | 6,8            | 0,2            | –              | –              | 67,6           | 29,1           | 5,4            | –               |
|       | Percolado | 29,8           | 384,3          | 532,3          | 845,3          | 1.140,0        | –              | 715,2          | 1.371,1        | 1.019,9        | 542,8           |
| V11   | Aplicado  | 6,0            | –              | 9,0            | 0,2            | –              | 28,3           | 90,1           | 38,7           | 7,2            | –               |
|       | Percolado | 159,8          | 274,0          | 823,6          | 816,3          | 961,6          | 962,3          | 971,2          | 1.089,0        | 1.341,9        | 1.084,8         |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

As altas cargas de nitrato percoladas mostram que houve efetiva nitrificação ao longo das dez semanas da Fase 2. Observa-se uma carga percolada menor nas primeiras duas semanas, que é função de um volume menor de líquido efluente nestas semanas (Fig. B.2), e de uma menor concentração de nitrato no efluente (Tab. A.14 a A.17).

**Figura 5.11** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  aplicadas e percoladas das leiras na Fase 2

### 5.3.2.5. Metais pesados

As cargas de metais pesados foram estabelecidas para a soma dos metais chumbo, níquel, cádmio e cromo, com os resultados sendo apresentados na tabela 5.17.

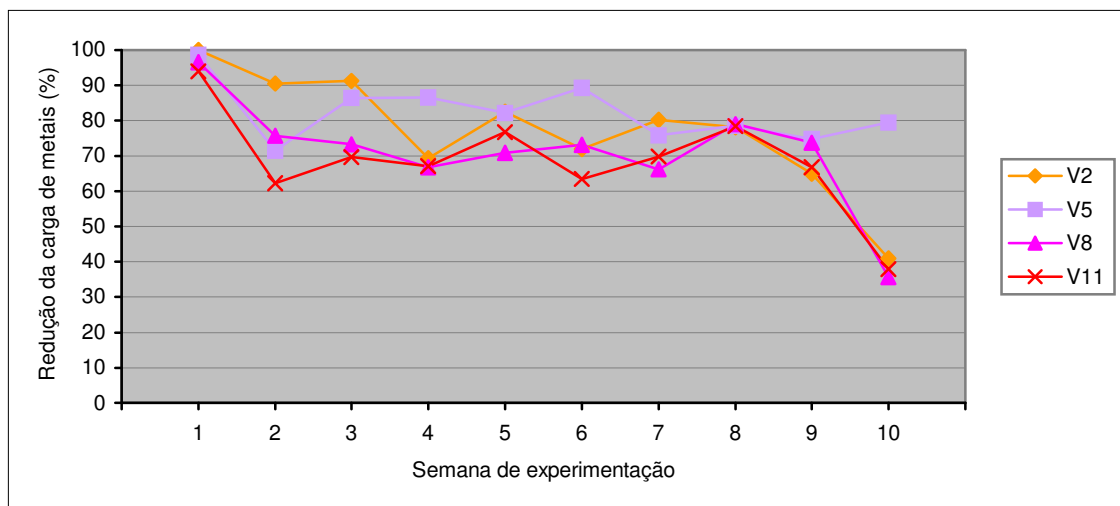


**Tabela 5.17** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr ) (mg/sem) aplicados e percolados, Fase 2

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V2    | Aplicado    | 0,126          | 0,084          | 0,114          | 0,072          | 0,126          | 0,096          | 0,096          | 0,114          | 0,120          | 0,066           |
|       | Percolado   | 0,000          | 0,008          | 0,010          | 0,022          | 0,023          | 0,027          | 0,019          | 0,025          | 0,042          | 0,039           |
|       | Redução (%) | 100            | 90,5           | 91,2           | 69,4           | 82,5           | 71,9           | 80,2           | 78,1           | 65,0           | 40,9            |
| V5    | Aplicado    | 0,195          | 0,130          | 0,177          | 0,112          | 0,195          | 0,149          | 0,149          | 0,177          | 0,186          | 0,102           |
|       | Percolado   | 0,004          | 0,037          | 0,024          | 0,015          | 0,035          | 0,016          | 0,036          | 0,038          | 0,047          | 0,021           |
|       | Redução (%) | 98,6           | 71,5           | 86,4           | 86,6           | 82,1           | 89,3           | 75,8           | 78,5           | 74,7           | 79,4            |
| V8    | Aplicado    | 0,284          | 0,189          | 0,257          | 0,162          | 0,284          | 0,216          | 0,216          | 0,257          | 0,270          | 0,149           |
|       | Percolado   | 0,010          | 0,046          | 0,069          | 0,054          | 0,083          | 0,058          | 0,073          | 0,054          | 0,071          | 0,096           |
|       | Redução (%) | 96,5           | 75,7           | 73,2           | 66,7           | 70,8           | 73,1           | 66,2           | 79,0           | 73,7           | 35,6            |
| V11   | Aplicado    | 0,378          | 0,252          | 0,342          | 0,216          | 0,378          | 0,288          | 0,288          | 0,342          | 0,360          | 0,198           |
|       | Percolado   | 0,023          | 0,095          | 0,104          | 0,071          | 0,088          | 0,105          | 0,087          | 0,074          | 0,120          | 0,123           |
|       | Redução (%) | 93,9           | 62,3           | 69,6           | 67,1           | 76,7           | 63,5           | 69,8           | 78,4           | 66,7           | 37,9            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

Na figura 5.12 é apresentada a redução percentual das cargas somadas dos quatro metais pesados analisados. Com exceção das leiras V5, V8 e V11 na semana 10, a eficiência de redução ficou sempre acima de 60 %. A eficiência menor da semana 10 pode-se ser em função das concentrações muito baixas dos metais, implicando erros de leitura devido a sensibilidade dos instrumentos de análise.



**Figura 5.12** – Redução de cargas de metais pesados do lixiviado na Fase 2

## **5.4. Fase 3**

### **5.4.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de vermicompostagem**

As tabelas A.19 a A.21 apresentam o pH, e as concentrações de macro e micronutrientes e metais pesados observados nos substratos das leiras de vermicompostagem, ao longo da realização da Fase 3 de experimentação. Para o desenvolvimento desta fase, foram utilizados composto e estrume bovino recentemente curados, razão pela qual estes apresentaram valores um pouco diferentes daqueles observados na Fase 1, para os diversos parâmetros constituintes analisados. Identicamente à Fase 1, verificou-se ao longo do processamento aumento generalizado nas concentrações de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , e principalmente de  $\text{NO}_3^-$ ; macro e micronutrientes apresentaram comportamentos diversos (aumentando ou reduzindo a concentração do início para o final do processo), dependendo do parâmetro; e metais pesados, diferentemente do observado na Fase 1, mostraram aumento de concentração, em alguns casos bastante significativa.

### **5.4.2. Caracterização do lixiviado bruto**

Na tabela A.18 são apresentadas as características do lixiviado bruto utilizado como líquido de rega das leiras ao longo da Fase 3. Nesta etapa, o lixiviado foi renovado quinzenalmente e controlado semanalmente. Identicamente ao observado na Fase 2, este, independentemente de sua renovação quinzenal, apresentou relativa estabilidade nas concentrações de DQO e macro e micronutrientes. NTK e  $\text{NH}_4^+$  apresentaram valores praticamente idênticos, atestando que o nitrogênio total de Kjeldahl encontrado nas amostras, era devido em praticamente sua totalidade ao nitrogênio amoniacal, manifesto pelas altas concentrações do íon  $\text{NH}_4^+$ . O pH situou-se em faixa levemente alcalina. Os metais pesados apresentaram concentrações iguais ou menores que 0,16 mg/L, ligeiramente superiores ao ocorrido no lixiviado utilizado na Fase 2. Ácidos voláteis não foram detectados.

### **5.4.3. Resultados das análises do percolado de cada leira**

A identificação das leiras, em termos do volume de lixiviado e/ou água deioni-

zada que receberam, das taxas de aplicação de líquido utilizadas, e da característica do substrato que cada uma dispunha em vermicompostagem, são as constantes da tabela 4.3.

As tabelas A.22 a A.33 apresentam os resultados observados para todos os parâmetros controlados em cada leira, ao longo da Fase 3, que teve a duração de dez semanas.

A análise gráfica dos resultados foi desenvolvida com base nos mesmos parâmetros interpretados nas Fases 1 e 2. A identificação das leiras, os substratos e o líquido de rega, e as taxas de aplicação utilizados estão na tabela 4.3. Os critérios para quantificação das cargas foram os mesmos utilizados nas fases anteriores, apresentando-se os resultados para DQO, NTK, nitrato e metais pesados.

#### 5.4.3.1. DQO

As cargas resultantes para esta fase estão nas tabelas 5.18 e 5.19. Das leiras que receberam lixiviado (V13 a V20), as leiras V13 e V14, de menores taxas de aplicação de lixiviado – 150 ml/d, tiveram volume de percolado efluente igual a zero na maioria das semanas. A leira V13 só apresentou percolado na quinta e sexta semanas, e a leira V14, na quarta a sexta semanas. Em função disso, as cargas percoladas nas demais semanas foram iguais a zero. O mesmo é válido para as cargas (nas mesmas semanas) dos demais parâmetros analisados desta fase.

**Tabela 5.18** – Cargas de DQO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
| V22   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 54             | 154            | 125            | 47             | 38             | 48             | 154            | 62              |
| V23   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 11             | 160            | 109            | 172            | 159            | 81             | 121            | 97             | 146            | 82              |
| V24   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 110            | 205            | 132            | 248            | 208            | 193            | 173            | 138            | 251            | 125             |

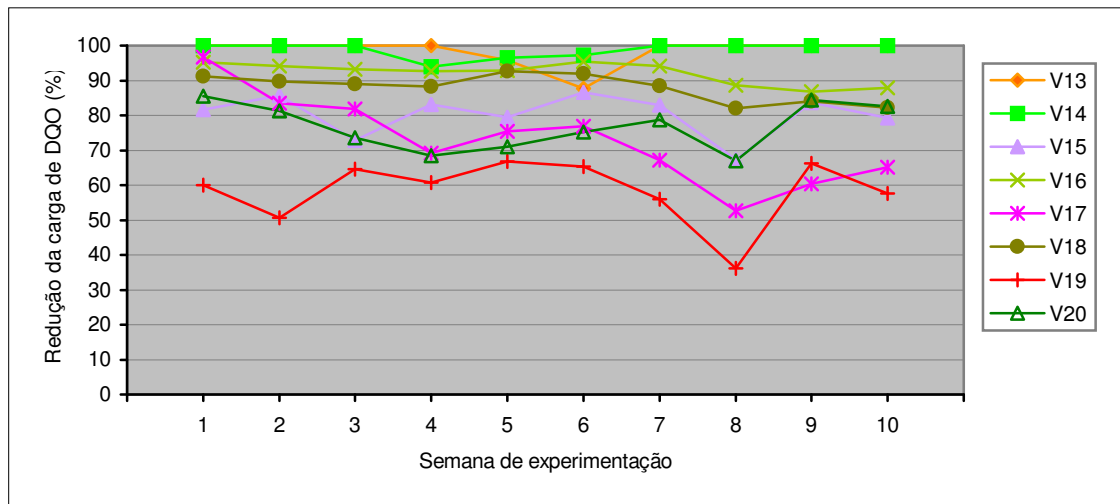
Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.19** – Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V13   | Aplicado    | 864            | 738            | 706            | 835            | 954            | 795            | 655            | 545            | 1035           | 909             |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 35             | 98             | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 95,8           | 87,7           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V14   | Aplicado    | 864            | 738            | 706            | 835            | 954            | 795            | 655            | 545            | 1035           | 909             |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 50             | 33             | 22             | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 94,0           | 96,6           | 97,3           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V15   | Aplicado    | 1.325          | 1.132          | 1.082          | 1.281          | 1.463          | 1.219          | 1.005          | 836            | 1.587          | 1.394           |
|       | Percolado   | 244            | 163            | 295            | 217            | 301            | 164            | 184            | 274            | 259            | 290             |
|       | Redução (%) | 81,6           | 85,6           | 72,8           | 83,1           | 79,4           | 86,6           | 83,0           | 67,3           | 83,6           | 79,2            |
| V16   | Aplicado    | 1.325          | 1.132          | 1.082          | 1.281          | 1.463          | 1.219          | 1.005          | 836            | 1.587          | 1.394           |
|       | Percolado   | 64             | 66             | 73             | 94             | 103            | 56             | 60             | 96             | 209            | 169             |
|       | Redução (%) | 95,2           | 94,2           | 93,2           | 92,7           | 92,9           | 95,4           | 94,1           | 88,6           | 86,8           | 87,9            |
| V17   | Aplicado    | 1.901          | 1.624          | 1.552          | 1.837          | 2.099          | 1.748          | 1.441          | 1.200          | 2.277          | 2.000           |
|       | Percolado   | 63             | 268            | 282            | 568            | 515            | 405            | 473            | 569            | 901            | 697             |
|       | Redução (%) | 96,7           | 83,5           | 81,8           | 69,1           | 75,5           | 76,8           | 67,2           | 52,6           | 60,4           | 65,1            |
| V18   | Aplicado    | 1.901          | 1.624          | 1.552          | 1.837          | 2.099          | 1.748          | 1.441          | 1.200          | 2.277          | 2.000           |
|       | Percolado   | 167            | 168            | 172            | 217            | 153            | 142            | 165            | 215            | 365            | 355             |
|       | Redução (%) | 91,2           | 89,7           | 88,9           | 88,2           | 92,7           | 91,9           | 88,5           | 82,1           | 84,0           | 82,2            |
| V19   | Aplicado    | 2.534          | 2.165          | 2.070          | 2.450          | 2.798          | 2.331          | 1.922          | 1.600          | 3.036          | 2.666           |
|       | Percolado   | 1.014          | 1.067          | 733            | 961            | 932            | 808            | 847            | 1.021          | 1.025          | 1.129           |
|       | Redução (%) | 60,0           | 50,7           | 64,6           | 60,8           | 66,7           | 65,4           | 56,0           | 36,2           | 66,2           | 57,7            |
| V20   | Aplicado    | 2.534          | 2.165          | 2.070          | 2.450          | 2.798          | 2.331          | 1.922          | 1.600          | 3.036          | 2.666           |
|       | Percolado   | 366            | 407            | 548            | 774            | 812            | 579            | 408            | 529            | 474            | 463             |
|       | Redução (%) | 85,5           | 81,2           | 73,5           | 68,4           | 71,0           | 75,2           | 78,8           | 67,0           | 84,4           | 82,6            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

A figura 5.13 apresenta as reduções percentuais da carga de DQO para as oito leiras que receberam a aplicação de lixiviado na Fase 3. Com exceção da leira V19 na semana 8, a redução de carga de DQO foi sempre superior a 50%. A figura mostra também uma nítida vantagem das leiras com composto como substrato sobre as com mistura. O mesmo pode ser notado com as concentrações no percolado efluente, conforme figura B.7.



**Figura 5.13** – Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 3

#### 5.4.3.2. DBO

As cargas resultantes para esta fase estão nas tabelas 5.20 e 5.21.

Como as amostras para análise da DBO sempre eram retiradas às quintas-feiras, nem sempre neste dia havia volume suficiente para a realização da análise. Quando o volume era insuficiente, aparece o sinal “–” nas tabelas a seguir.

N figura 5.14 são apresentadas as reduções percentuais da carga de DBO para as oito leiras que receberam a aplicação de lixiviado na Fase 3. Com exceção da leira V17 na semana 3, e da leira V19 nas semanas 2, 3 e 8, a redução de carga de DBO foi sempre superior a 70 %, e a 90 % na maioria das amostras. A figura mostra também uma nítida vantagem das leiras com composto como substrato sobre as com mistura, possivelmente por uma maior solubilização dos materiais neste último substrato.

**Tabela 5.20** – Cargas de DBO (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3

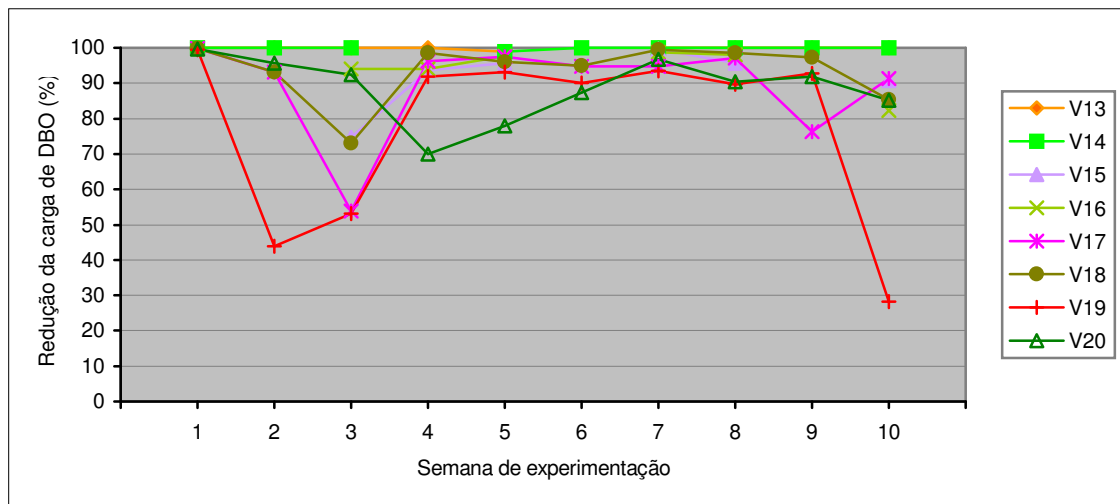
| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
| V22   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 11             | 22             | 16             | –              | 4              | 24             | –              | –               |
| V23   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 5              | 21             | 38             | 33             | 19             | 17             | 19             | 44             | 12              |
| V24   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 3              | 31             | 20             | 17             | 73             | 47             | 20             | 69             | 45             | 2               |

Obs.: mg/sem = miligramas por semana

**Tabela 5.21** – Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V13   | Aplicado    | 522            | 79             | 54             | 133            | 315            | 162            | 450            | 279            | 198            | 99              |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 3              | –              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 99,0           | –              | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V14   | Aplicado    | 522            | 79             | 54             | 133            | 315            | 162            | 450            | 279            | 198            | 99              |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | –              | 3              | –              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | –              | 99,0           | –              | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V15   | Aplicado    | 800            | 121            | 83             | 204            | 483            | 248            | 690            | 428            | 304            | 152             |
|       | Percolado   | –              | –              | 21             | 13             | 21             | –              | 3              | 19             | –              | 14              |
|       | Redução (%) | –              | –              | 74,7           | 93,6           | 95,7           | –              | 99,6           | 95,6           | –              | 90,8            |
| V16   | Aplicado    | 800            | 121            | 83             | 204            | 483            | 248            | 690            | 428            | 304            | 152             |
|       | Percolado   | –              | –              | 5              | 12             | 11             | –              | 9              | 8              | –              | 27              |
|       | Redução (%) | –              | –              | 94,0           | 94,1           | 97,7           | –              | 98,7           | 98,1           | –              | 82,2            |
| V17   | Aplicado    | 1.148          | 174            | 119            | 293            | 693            | 356            | 990            | 614            | 436            | 218             |
|       | Percolado   | 1              | 12             | 55             | 11             | 18             | 19             | 52             | 18             | 103            | 19              |
|       | Redução (%) | 99,9           | 93,1           | 53,8           | 96,2           | 97,4           | 94,7           | 94,7           | 97,1           | 76,4           | 91,3            |
| V18   | Aplicado    | 1.148          | 174            | 119            | 293            | 693            | 356            | 990            | 614            | 436            | 218             |
|       | Percolado   | 2              | 12             | 32             | 4              | 27             | 18             | 5              | 9              | 12             | 32              |
|       | Redução (%) | 99,8           | 93,1           | 73,1           | 98,6           | 96,1           | 94,9           | 99,5           | 98,5           | 97,2           | 85,3            |
| V19   | Aplicado    | 1.531          | 232            | 158            | 390            | 924            | 475            | 1.320          | 818            | 581            | 290             |
|       | Percolado   | 9              | 130            | 74             | 32             | 63             | 47             | 86             | 84             | 42             | 208             |
|       | Redução (%) | 99,4           | 44,0           | 53,2           | 91,8           | 93,2           | 90,1           | 93,5           | 89,7           | 92,8           | 28,3            |
| V20   | Aplicado    | 1.531          | 232            | 158            | 390            | 924            | 475            | 1.320          | 818            | 581            | 290             |
|       | Percolado   | 6              | 10             | 12             | 117            | 203            | 60             | 44             | 78             | 47             | 43              |
|       | Redução (%) | 99,6           | 95,7           | 92,4           | 70,0           | 78,0           | 87,4           | 96,7           | 90,5           | 91,9           | 85,2            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Figura 5.14** – Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 3

### 5.4.3.3. NTK

Os resultados para NTK da Fase 3 estão apresentados nas tabelas 5.22 e 5.23. Pode-se notar a efetiva oxidação do nitrogênio no processo, dadas as baixíssimas cargas per-

coladas, em relação às cargas aplicadas.

A figura 5.15 apresenta as reduções nas cargas de NTK, que foram na sua maioria superiores a 99 %. Ao contrário do que ocorreu com a DQO, aqui não se observou diferença clara entre os dois diferentes tipos de substratos utilizados.

**Tabela 5.22** – Cargas de NTK (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3

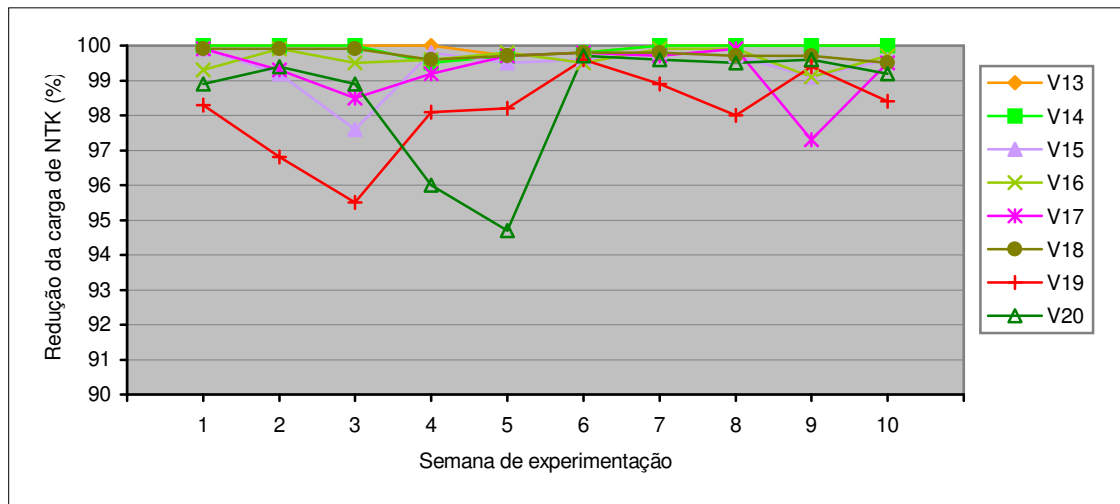
| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0            | 0,0             |
| V22   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,0            | 0,0            | 0,8            | 12,3           | 1,9            | 0,8            | 0,6            | 4,4            | 1,9            | 0,1             |
| V23   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,0            | 0,6            | 1,1            | 3,3            | 2,7            | 2,5            | 2,2            | 33,8           | 1,0            | 1,2             |
| V24   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 3,8            | 1,1            | 1,8            | 7,5            | 2,9            | 3,3            | 1,9            | 10,7           | 2,8            | 2,6             |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.23** – Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V13   | Aplicado    | 529,2          | 541,8          | 448,2          | 456,3          | 617,4          | 603,0          | 614,7          | 622,8          | 529,2          | 585,0           |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 1,21           | 1,12           | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 99,7           | 99,8           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V14   | Aplicado    | 529,2          | 541,8          | 448,2          | 456,3          | 617,4          | 603,0          | 614,7          | 622,8          | 529,2          | 585,0           |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 2,31           | 1,61           | 1,22           | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 99,5           | 99,7           | 99,8           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V15   | Aplicado    | 811,4          | 830,8          | 687,2          | 799,7          | 946,7          | 924,6          | 942,5          | 955,0          | 811,4          | 897,0           |
|       | Percolado   | 0,3            | 6,8            | 16,2           | 1,7            | 4,6            | 3,7            | 2,1            | 2,9            | 6,9            | 3,9             |
|       | Redução (%) | 99,9           | 99,2           | 97,6           | 99,8           | 99,5           | 99,6           | 99,8           | 99,7           | 99,1           | 99,6            |
| V16   | Aplicado    | 811,4          | 830,8          | 687,2          | 799,7          | 946,7          | 924,6          | 942,5          | 955,0          | 811,4          | 897,0           |
|       | Percolado   | 6,0            | 0,3            | 3,2            | 2,9            | 1,5            | 4,5            | 1,1            | 0,9            | 7,1            | 2,7             |
|       | Redução (%) | 99,3           | 99,9           | 99,5           | 99,6           | 99,8           | 99,5           | 99,9           | 99,9           | 99,1           | 99,7            |
| V17   | Aplicado    | 1.164,2        | 1.192,0        | 986,0          | 1.003,9        | 1.358,3        | 1.326,6        | 1.352,3        | 1.370,2        | 1.164,2        | 1.287,0         |
|       | Percolado   | 0,8            | 8,3            | 14,9           | 8,5            | 4,1            | 3,1            | 4,6            | 13,0           | 31,5           | 6,1             |
|       | Redução (%) | 99,9           | 99,3           | 98,5           | 99,2           | 99,7           | 99,8           | 99,7           | 99,9           | 97,3           | 99,5            |
| V18   | Aplicado    | 1.164,2        | 1.192,0        | 986,0          | 1.003,9        | 1.358,3        | 1.326,6        | 1.352,3        | 1.370,2        | 1.164,2        | 1.287,0         |
|       | Percolado   | 1,7            | 1,0            | 0,9            | 4,1            | 4,7            | 3,0            | 3,3            | 4,2            | 5,1            | 7,1             |
|       | Redução (%) | 99,9           | 99,9           | 99,9           | 99,6           | 99,7           | 99,8           | 99,8           | 99,7           | 99,7           | 99,5            |
| V19   | Aplicado    | 1.552,3        | 1.589,3        | 1.314,7        | 1.338,5        | 1.811,0        | 1.768,8        | 1.803,1        | 1.826,9        | 1.552,3        | 1.716,0         |
|       | Percolado   | 26,0           | 51,3           | 59,8           | 25,0           | 31,7           | 6,4            | 19,5           | 35,8           | 9,9            | 28,2            |
|       | Redução (%) | 98,3           | 96,8           | 95,5           | 98,1           | 98,2           | 99,6           | 98,9           | 98,0           | 99,4           | 98,4            |
| V20   | Aplicado    | 1.552,3        | 1.589,3        | 1.314,7        | 1.338,5        | 1.811,0        | 1.768,8        | 1.803,1        | 1.826,9        | 1.552,3        | 1.716,0         |
|       | Percolado   | 17,6           | 9,9            | 14,2           | 53,4           | 95,4           | 6,0            | 6,4            | 9,9            | 6,6            | 12,9            |
|       | Redução (%) | 98,9           | 99,4           | 98,9           | 96,0           | 94,7           | 99,7           | 99,6           | 99,5           | 99,6           | 99,2            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Figura 5.15** – Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 3

#### 5.4.3.4. $\text{NO}_3^-$

As cargas de nitrato são apresentadas na tabelas 5.24 e 5.25, com os resultados graficados na figura 5.16. Assim como nas duas fases anteriores, a figura 5.16 mostra a grande nitrificação ocorrida ao longo das dez semanas da Fase 3

**Tabela 5.24** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
| V22   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,0            | 4,0            | 309,4          | 188,3          | 318,5          | –              | –              | 299,0          | 154,8          | 69,4            |
| V23   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,0            | 375,4          | 611,1          | 467,0          | 530,0          | 361,7          | 415,1          | 372,7          | 244,2          | 340,3           |
| V24   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | –              | –              | –              | 611,5          | 711,4          | 313,3          | –              | 869,2          | 664,7          | 421,0           |

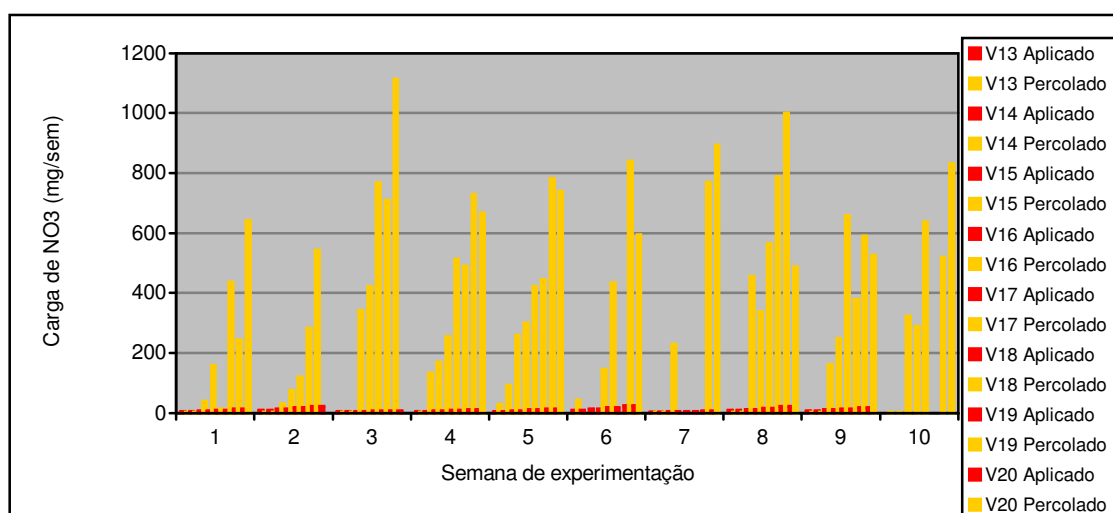
Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Tabela 5.25** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V13   | Aplicado  | 3,6            | 7,0            | 1,9            | 2,9            | 3,8            | 7,3            | 1,5            | 6,6            | 5,5            | –               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 0              | 26,0           | 40,9           | 0              | 0              | 0              | 0               |
| V14   | Aplicado  | 3,6            | 7,0            | 1,9            | 2,9            | 3,8            | 7,3            | 1,5            | 6,6            | 5,5            | –               |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 130,8          | 90,7           | –              | 0              | 0              | 0              | 0               |
| V15   | Aplicado  | 5,5            | 10,7           | 3,0            | 4,4            | 5,8            | 11,2           | 2,3            | 10,1           | 8,4            | –               |
|       | Percolado | 37,7           | 27,5           | 339,4          | 168,1          | 257,9          | –              | 227,4          | 454,0          | 159,4          | 320,5           |
| V16   | Aplicado  | 5,5            | 10,7           | 3,0            | 4,4            | 5,8            | 11,2           | 2,3            | 10,1           | 8,4            | –               |
|       | Percolado | 156,7          | 73,9           | 420,2          | 252,7          | 297,4          | 144,4          | –              | 335,3          | 246,8          | 288,0           |
| V17   | Aplicado  | 7,9            | 15,4           | 4,3            | 6,3            | 8,3            | 16,1           | 3,3            | 14,5           | 12,1           | –               |
|       | Percolado | 12,1           | 119,0          | 765,3          | 510,4          | 419,2          | 433,1          | –              | 562,9          | 656,5          | 634,4           |
| V18   | Aplicado  | 7,9            | 15,4           | 4,3            | 6,3            | 8,3            | 16,1           | 3,3            | 14,5           | 12,1           | –               |
|       | Percolado | 434,8          | 280,3          | 707,1          | 488,2          | 443,1          | –              | –              | 787,6          | 377,1          | –               |
| V19   | Aplicado  | 10,6           | 20,5           | 5,7            | 8,4            | 11,0           | 21,5           | 4,4            | 19,4           | 16,1           | –               |
|       | Percolado | 242,8          | 541,9          | 1.112,1        | 726,0          | 780,9          | 838,6          | 766,8          | 997,6          | 588,5          | 518,3           |
| V20   | Aplicado  | 10,6           | 20,5           | 5,7            | 8,4            | 11,0           | 21,5           | 4,4            | 19,4           | 16,1           | –               |
|       | Percolado | 640,2          | –              | –              | 665,9          | 736,5          | 591,4          | 892,3          | 484,7          | 524,2          | 829,2           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Figura 5.16** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  aplicadas e percoladas das leiras na Fase 3

#### 5.4.3.5. Metais pesados

As cargas das somas de metais pesados analisados somados estão nas tabelas 5.26 e 5.27, estando os resultados da eficiência de redução de metais pesados do lixiviado apresentados na figura 5.17. As eficiências de redução foram todas superiores a 80 %, não se verificando grandes flutuações nas 10 semanas da experimentação.

**Tabela 5.26** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr ) (mg/sem) percoladas nas leiras regadas com água, Fase 3

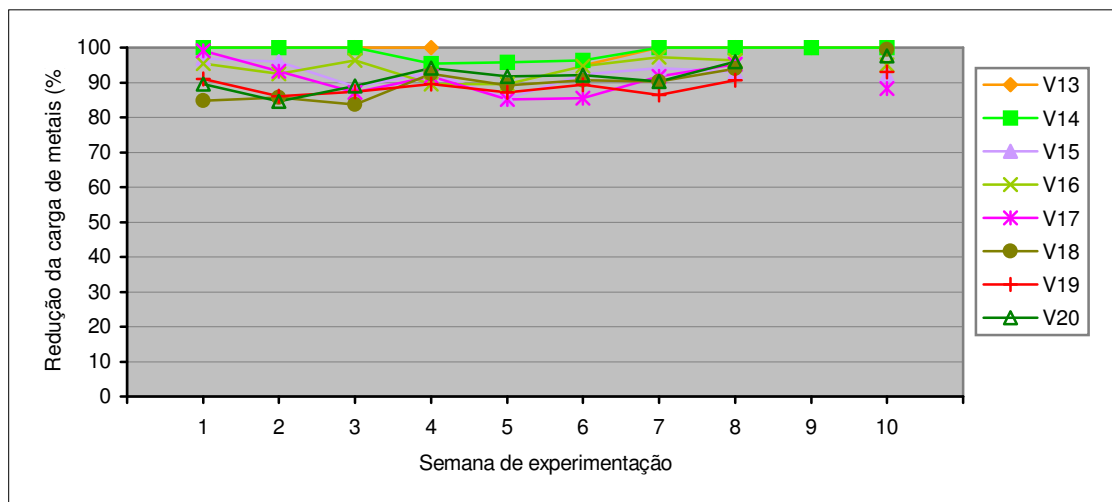
| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000           |
| V22   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,000          | 0,000          | 0,016          | 0,012          | 0,017          | 0,004          | 0,002          | 0,003          | 0,004          | 0,004           |
| V23   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,000          | 0,028          | 0,037          | 0,033          | 0,036          | 0,010          | 0,010          | 0,012          | 0,015          | 0,007           |
| V24   | Aplicado  | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
|       | Percolado | 0,015          | 0,033          | 0,043          | 0,037          | 0,046          | 0,036          | 0,020          | 0,014          | 0,006          | 0,005           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Tabela 5.27** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr ) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 3

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> | 9 <sup>a</sup> | 10 <sup>a</sup> |
| V13   | Aplicado    | 0,185          | 0,095          | 0,158          | 0,194          | 0,168          | 0,135          | 0,144          | 0,195          | –              | 0,183           |
|       | Percolado   | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | –              | 0,007          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000           |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | –              | 94,8           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V14   | Aplicado    | 0,185          | 0,095          | 0,158          | 0,194          | 0,168          | 0,135          | 0,144          | 0,195          | –              | 0,183           |
|       | Percolado   | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,009          | 0,007          | 0,005          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000           |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 95,4           | 95,8           | 96,3           | 100            | 100            | 100            | 100             |
| V15   | Aplicado    | 0,284          | 0,146          | 0,242          | 0,297          | 0,258          | 0,207          | 0,221          | 0,299          | –              | 0,281           |
|       | Percolado   | 0,009          | 0,006          | 0,027          | 0,021          | 0,038          | 0,016          | 0,013          | 0,021          | 0,019          | 0,022           |
|       | Redução (%) | 96,8           | 95,9           | 88,8           | 92,9           | 85,3           | 92,3           | 94,1           | 93,0           |                | 92,2            |
| V16   | Aplicado    | 0,284          | 0,146          | 0,242          | 0,297          | 0,258          | 0,207          | 0,221          | 0,299          | –              | 0,281           |
|       | Percolado   | 0,013          | 0,011          | 0,009          | 0,031          | 0,027          | 0,011          | 0,006          | 0,011          | 0,013          | 0,014           |
|       | Redução (%) | 95,4           | 92,5           | 96,3           | 89,6           | 89,5           | 94,7           | 97,3           | 96,3           |                | 95,0            |
| V17   | Aplicado    | 0,407          | 0,209          | 0,348          | 0,427          | 0,370          | 0,297          | 0,317          | 0,429          | –              | 0,403           |
|       | Percolado   | 0,004          | 0,014          | 0,045          | 0,035          | 0,055          | 0,043          | 0,026          | 0,020          | 0,023          | 0,047           |
|       | Redução (%) | 99,0           | 93,3           | 87,1           | 91,8           | 85,1           | 85,5           | 91,8           | 95,3           |                | 88,3            |
| V18   | Aplicado    | 0,407          | 0,209          | 0,348          | 0,427          | 0,370          | 0,297          | 0,317          | 0,429          | –              | 0,403           |
|       | Percolado   | 0,062          | 0,030          | 0,057          | 0,032          | 0,040          | 0,028          | 0,031          | 0,026          | 0,019          | 0,002           |
|       | Redução (%) | 84,8           | 85,6           | 83,6           | 92,5           | 89,2           | 90,6           | 90,2           | 93,9           |                | 99,5            |
| V19   | Aplicado    | 0,543          | 0,279          | 0,463          | 0,569          | 0,493          | 0,396          | 0,422          | 0,572          | –              | 0,537           |
|       | Percolado   | 0,049          | 0,039          | 0,059          | 0,060          | 0,063          | 0,042          | 0,057          | 0,054          | 0,035          | 0,037           |
|       | Redução (%) | 91,0           | 86,0           | 87,3           | 89,6           | 87,2           | 89,4           | 86,5           | 90,6           |                | 93,1            |
| V20   | Aplicado    | 0,543          | 0,279          | 0,463          | 0,569          | 0,493          | 0,396          | 0,422          | 0,572          | –              | 0,537           |
|       | Percolado   | 0,057          | 0,043          | 0,051          | 0,033          | 0,041          | 0,031          | 0,041          | 0,023          | 0,020          | 0,013           |
|       | Redução (%) | 89,5           | 84,6           | 89,0           | 94,2           | 91,7           | 92,2           | 90,2           | 96,0           |                | 97,6            |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Figura 5.17** – Redução de cargas de metais pesados do lixiviado na Fase 3

## 5.5. Fase 4

A Fase 4 foi desenvolvida com os mesmos objetivos estabelecidos na Fase 2. De leiras que na Fase 3 haviam sido vermicompostadas, submetidas a uma sistemática de rega com água deionizada, e cujo substrato sólido estava constituído de composto orgânico, retirou-se as minhocas que processaram o material anteriormente, observando-se a eficiência somente do húmus (sem a presença dos vermes) na atenuação/remoção das características tóxicas do lixiviado que foi aplicado sobre estas (leiras V21 a V24).

### 5.5.1. Caracterização físico-química do substrato de cada leira de vermicompostagem

Nas tabelas A.35 e A.36 são apresentados o pH e as concentrações de macro e micronutrientes e metais pesados observados nas leiras de vermicompostagem, ao longo da realização da Fase 4 de experimentação.

### 5.5.2. Caracterização do lixiviado bruto

Na tabela A.34 são apresentadas as características do lixiviado bruto utilizado como líquido de rega das leiras (sem minhocas) ao longo da Fase 4. Identicamente às Fases 2 e 3, o lixiviado foi renovado quinzenalmente e controlado semanalmente, observando-se nesta

etapa características semelhantes às aquelas observadas nas fases referidas. Em quatro incursões, no entanto, detectou-se ácidos voláteis (acético e iso-butírico); as concentrações de metais pesados foram ligeiramente inferiores as detectadas nas demais fases.

### 5.5.3. Resultados das análises do percolado de cada leira

As quatro leiras estudadas, com o volume de líquido (lixiviado) que receberam diariamente, 6 dias por semana, estão identificadas na tabela seguinte.

**Tabela 5.28** – Características intrínsecas a cada leira de vermicompostagem (composto como substrato)

| Leira | Taxa aplicação de lixiviado (ml/d) |
|-------|------------------------------------|
| V21   | 150                                |
| V22   | 230                                |
| V23   | 330                                |
| V24   | 440                                |

Nas tabelas A.37 e A.38 são apresentados os resultados observados para todos os parâmetros controlados em cada leira, ao longo da Fase 4, que teve a duração de 8 semanas.

A análise gráfica dos resultados para as leiras V21, V22, V23 e V24 foi desenvolvida com base nos mesmos parâmetros interpretados nas demais fases. Os critérios adotados na quantificação das cargas foram os mesmos utilizados nas demais fases, obtendo-se os resultados apostos nas tabelas 5.29 a 5.33 e materializados nas figuras 5.18 a 5.22.

Ao longo de toda esta fase, a leira V21 não teve geração de percolado, sendo portanto, as cargas de todos os parâmetros analisados iguais a zero. A taxa de aplicação desta leira foi a mesma das leiras V13 e V14 da Fase 3, que também tiveram geração zero de percolado. A leira V22 começou a ter geração de percolado somente a partir da semana 4.

#### 5.5.3.1. DQO

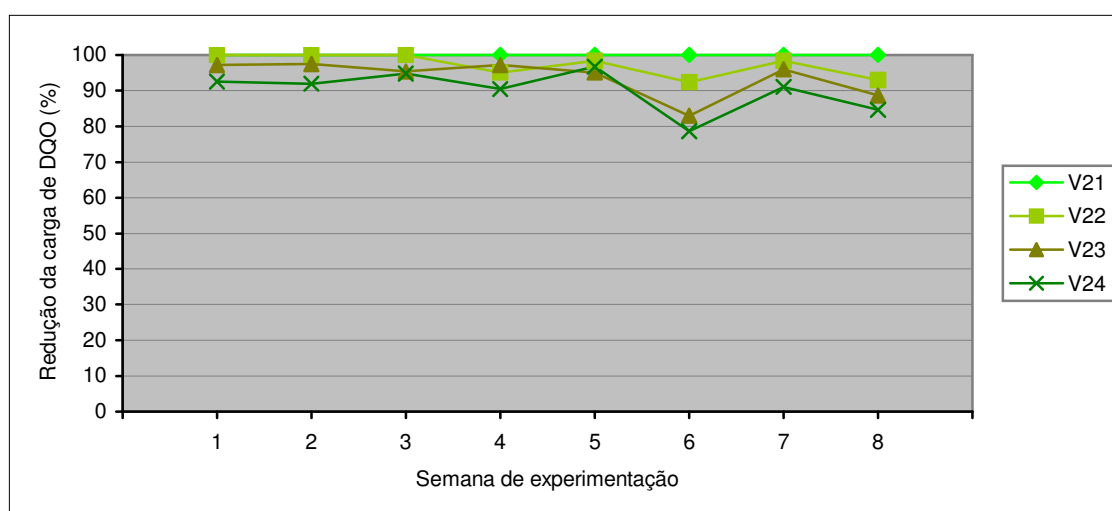
Na tabela 5.29 estão as cargas aplicadas e percoladas para as quatro leiras utilizadas nesta fase. A redução de carga foi bastante regular ao longo das oito semanas de experimentação, sempre acima de 80 % de eficiência. Nas leiras que tiveram geração de percolado, uma pequena diminuição da eficiência foi verificada nas semanas 6 e 8. Como a concentração

de DQO efluente não sofreu grande variação ao longo da fase (Fig. B.8), atribui-se este fato a um maior volume de percolado gerado nestas semanas (Fig. B.4).

**Tabela 5.29** – Cargas de DQO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado    | 837            | 1.053          | 1.026          | 702            | 549            | 612            | 765            | 648            |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| V22   | Aplicado    | 1.283          | 1.615          | 1.573          | 1.076          | 842            | 938            | 1.173          | 994            |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 54             | 14             | 71             | 18             | 71             |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 95,0           | 98,4           | 92,4           | 98,4           | 92,9           |
| V23   | Aplicado    | 1.841          | 2.317          | 2.257          | 2.367          | 1.208          | 1.346          | 1.683          | 1.426          |
|       | Percolado   | 53             | 60             | 107            | 67             | 60             | 229            | 68             | 163            |
|       | Redução (%) | 97,1           | 97,4           | 95,3           | 97,2           | 95,0           | 83,0           | 96,0           | 88,6           |
| V24   | Aplicado    | 2.455          | 3.089          | 3.010          | 2.059          | 1.610          | 1.795          | 2.244          | 1.901          |
|       | Percolado   | 181            | 249            | 161            | 197            | 53             | 385            | 202            | 293            |
|       | Redução (%) | 92,6           | 91,9           | 94,7           | 90,4           | 96,7           | 78,6           | 91,0           | 84,6           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Figura 5.18** – Redução de cargas de DQO do lixiviado na Fase 4

### 5.5.3.2. DBO

Na tabela 5.30 estão as cargas aplicadas e percoladas para as quatro leiras utilizadas nesta fase. A redução de carga foi sempre superior a 70 %.

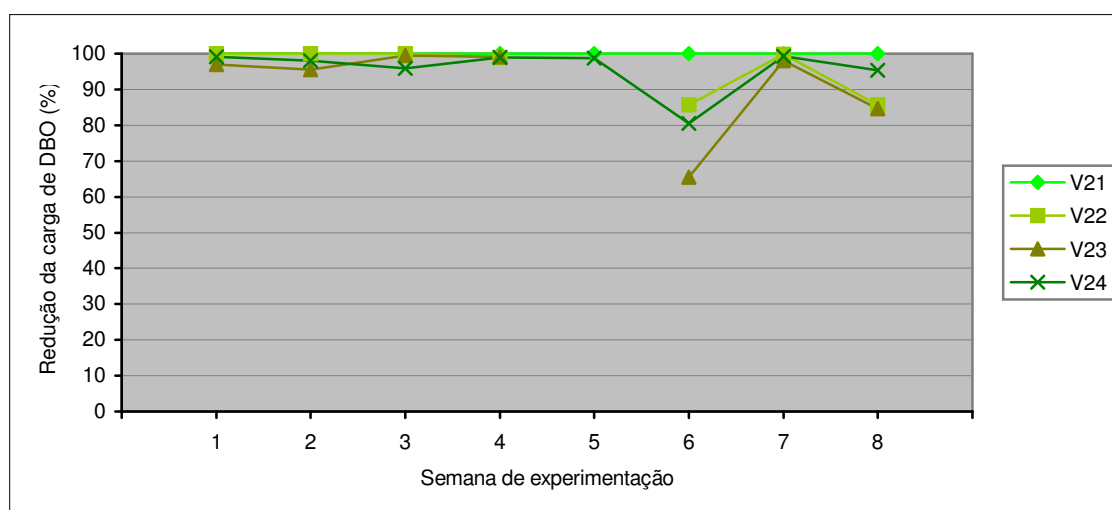
A DBO do lixiviado afluente não era muito elevada nesta fase, atingindo um máximo de 340 mg/L na semana 7 (Tab. A.34), caracterizando um lixiviado já bastante biodegradado. Mesmo assim, as leiras de vermicomposto tiveram excelente eficácia, pois conforme mostram a figura B.12 e as tabelas A.37 e A.38, a DBO efluente máxima foi de 37

mg/L, atingindo valores tão baixos como 2 mg/L em várias semanas.

**Tabela 5.30** – Cargas de DBO (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado    | 75             | 50             | 99             | 198            | 207            | 63             | 306            | 59             |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| V22   | Aplicado    | 115            | 77             | 152            | 304            | 317            | 97             | 469            | 90             |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 3              | –              | 14             | 1              | 13             |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 99,0           | –              | 85,6           | 99,8           | 85,6           |
| V23   | Aplicado    | 165            | 110            | 218            | 436            | 455            | 139            | 673            | 130            |
|       | Percolado   | 5              | 5              | 1              | 4              | –              | 48             | 13             | 20             |
|       | Redução (%) | 97,0           | 95,5           | 99,5           | 99,1           | –              | 65,5           | 98,1           | 84,6           |
| V24   | Aplicado    | 220            | 147            | 290            | 581            | 607            | 185            | 898            | 173            |
|       | Percolado   | 2              | 3              | 12             | 6              | 8              | 36             | 7              | 8              |
|       | Redução (%) | 99,1           | 98,0           | 95,9           | 99,0           | 98,7           | 80,5           | 99,2           | 95,4           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Figura 5.19** – Redução de cargas de DBO do lixiviado na Fase 4

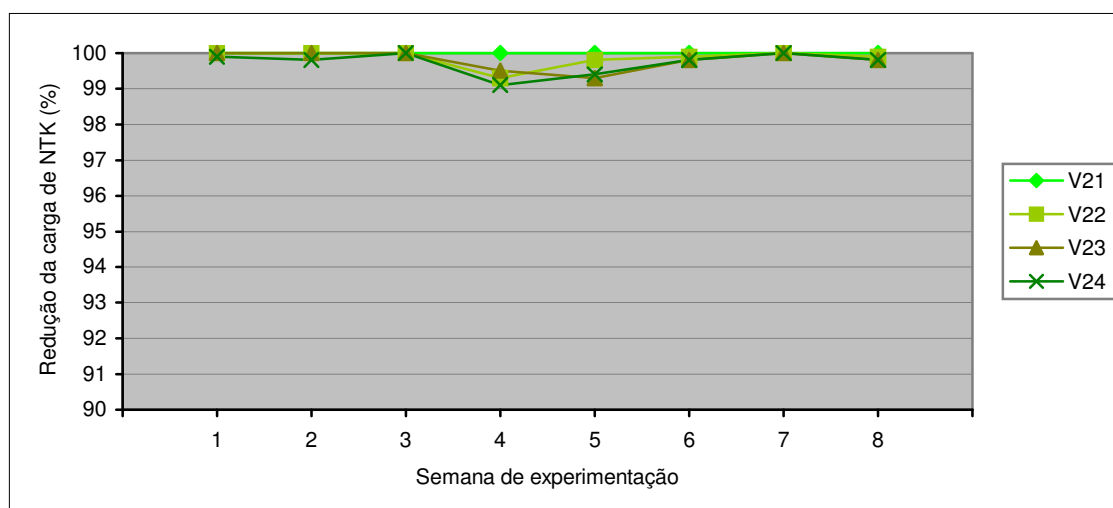
### 5.5.3.3. NTK

Conforme pode ser visto na tabela 5.31 e na figura 5.20, na Fase 4 a remoção do NTK do lixiviado foi quase total, sendo que todas as leiras, em todas as semanas da experimentação, apresentaram redução de carga superior a 99 %. Entre as quatro fases da pesquisa, esta foi a que apresentou a maior redução de carga de NTK, sendo que apenas na semana 4 as concentrações foram na ordem de 10 mg/L, e nas demais, sempre menor que 2 mg/L.

**Tabela 5.31** – Cargas de NTK (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado    | 529,2          | 448,2          | 541,8          | 478,8          | 43,2           | 432,0          | 529,2          | 541,8          |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| V22   | Aplicado    | 811,4          | 687,2          | 830,8          | 734,2          | 66,2           | 662,4          | 811,4          | 830,8          |
|       | Percolado   | 0              | 0              | 0              | 5,4            | 0,1            | 0,6            | 0,1            | 1,2            |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 99,3           | 99,8           | 99,9           | 100            | 99,9           |
| V23   | Aplicado    | 1.164,2        | 986,0          | 1.192,0        | 1053,4         | 95,0           | 950,4          | 1.164,2        | 1.192,0        |
|       | Percolado   | 0,5            | 0,3            | 0,5            | 5,6            | 0,7            | 1,4            | 0,3            | 2,0            |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 99,5           | 99,3           | 99,8           | 100            | 99,8           |
| V24   | Aplicado    | 1.552,3        | 1.314,7        | 1.589,3        | 1.404,5        | 1.26,7         | 1.267,2        | 1.552,3        | 1.589,3        |
|       | Percolado   | 1,6            | 2,2            | 0,6            | 13,0           | 0,8            | 2,1            | 0,6            | 2,6            |
|       | Redução (%) | 99,9           | 99,8           | 100            | 99,1           | 99,4           | 99,8           | 100            | 99,8           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Figura 5.20** – Redução de cargas de NTK do lixiviado na Fase 4

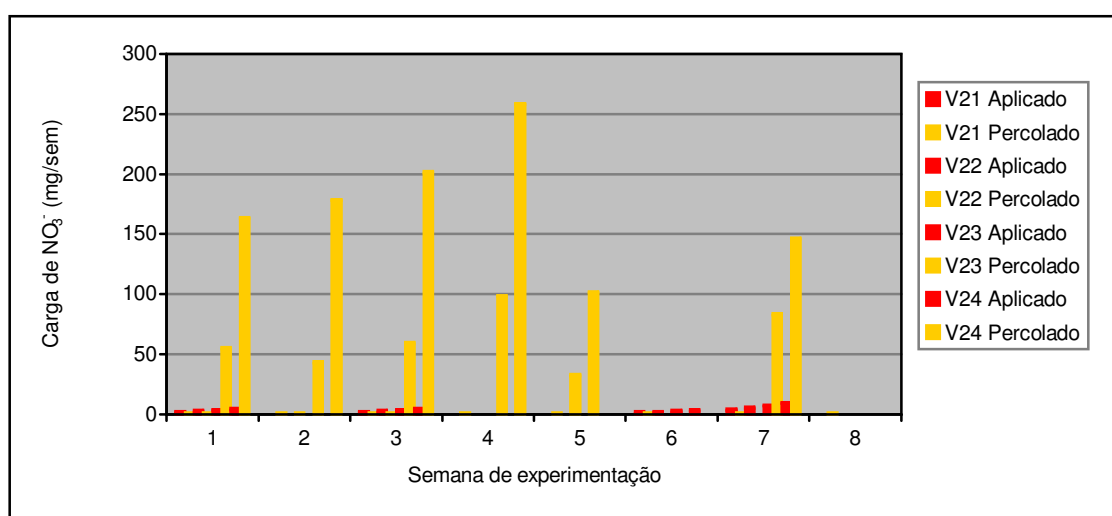
#### 5.5.3.4. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Na tabela 5.32 as lacunas nas cargas aplicadas e percoladas devem-se a problemas de amostragem e análise das amostras, de modo que os resultados não estão disponíveis. No entanto, os resultados constantes na figura 5.21 demonstram que também nesta fase houve a efetiva nitrificação da amônia, que é a parcela maior do nitrogênio total no lixiviado afluyente.

**Tabela 5.32** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4

| Leira | Líquido   | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |           | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado  | 1,3            | –              | 1,3            | –              | –              | 0,9            | 3,0            | –              |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              |
| V22   | Aplicado  | 1,93           | –              | 2,0            | –              | –              | 1,3            | 4,6            | –              |
|       | Percolado | 0              | 0              | 0              | –              | 31,8           | –              | –              | –              |
| V23   | Aplicado  | 2,8            | –              | 2,9            | –              | –              | 1,9            | 6,6            | –              |
|       | Percolado | 54,2           | 42,6           | 58,4           | 97,9           | 100,9          | –              | 82,4           | –              |
| V24   | Aplicado  | 3,7            | –              | 3,9            | –              | –              | 2,5            | 8,8            | –              |
|       | Percolado | 162,8          | 177,7          | 200,9          | 257,7          | –              | –              | 145,9          | –              |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana

**Figura 5.21** – Cargas de  $\text{NO}_3^-$  aplicadas e percoladas das leiras na Fase 4

### 5.5.3.5. Metais pesados

Conforme pode ser visto na tabela 5.33 e na figura 5.22, a redução da carga de metais pesados somados (Pb, Ni, Cd e Cr) foi excelente, que com exceção da semana 2 da leira V24, obteve-se eficiência superior a 90 % para todas as leiras ao longo das oito semanas de estudo.

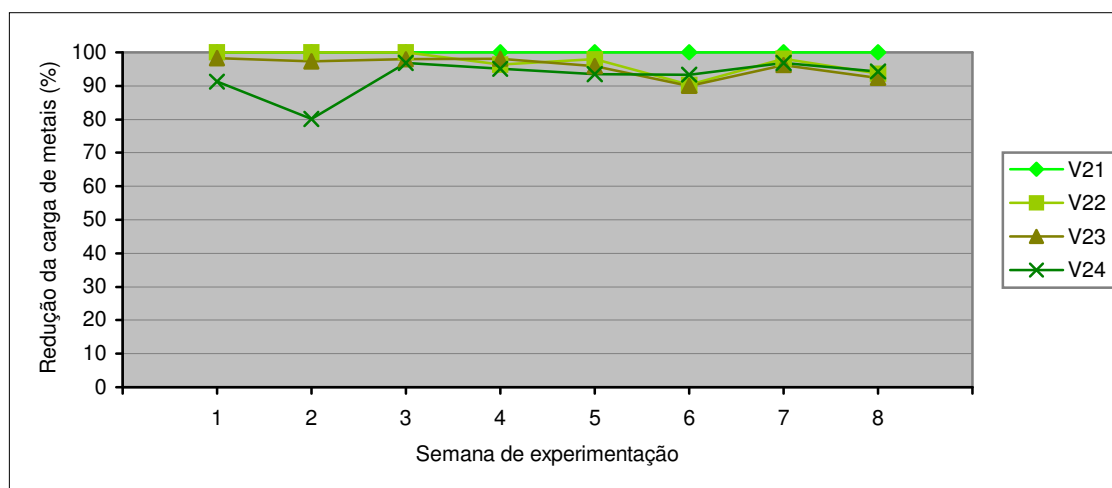
Em termos de concentrações de metais isolados, conforme se pode ver nas figuras B.17 a B.32, a Fase 4 foi a que apresentou as menores concentrações de metais pesados dentre as quatro diferentes fases estudadas. Para os metais níquel, cádmio e cromo, a redução foi de 100 % na maioria das semanas em todas as leiras ao longo desta fase.



**Tabela 5.33** – Cargas de metais pesados (Pb + Ni + Cd + Cr ) (mg/sem) aplicadas e percoladas, Fase 4

| Leira | Líquido     | Semana         |                |                |                |                |                |                |                |
|-------|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       |             | 1 <sup>a</sup> | 2 <sup>a</sup> | 3 <sup>a</sup> | 4 <sup>a</sup> | 5 <sup>a</sup> | 6 <sup>a</sup> | 7 <sup>a</sup> | 8 <sup>a</sup> |
| V21   | Aplicado    | 0,106          | 0,068          | 0,116          | 0,140          | 0,098          | 0,081          | 0,105          | 0,083          |
|       | Percolado   | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          | 0,000          |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            | 100            |
| V22   | Aplicado    | 0,163          | 0,105          | 0,178          | 0,215          | 0,150          | 0,124          | 0,161          | 0,127          |
|       | Percolado   | 0,00           | 0,00           | 0,00           | 0,008          | 0,003          | 0,012          | 0,003          | 0,008          |
|       | Redução (%) | 100            | 100            | 100            | 96,3           | 98,0           | 90,3           | 98,1           | 93,7           |
| V23   | Aplicado    | 0,233          | 0,150          | 0,255          | 0,308          | 0,216          | 0,178          | 0,231          | 0,183          |
|       | Percolado   | 0,004          | 0,004          | 0,005          | 0,006          | 0,009          | 0,018          | 0,009          | 0,014          |
|       | Redução (%) | 98,3           | 97,3           | 98,0           | 98,1           | 95,8           | 89,9           | 96,1           | 92,3           |
| V24   | Aplicado    | 0,312          | 0,201          | 0,341          | 0,412          | 0,288          | 0,238          | 0,309          | 0,243          |
|       | Percolado   | 0,027          | 0,040          | 0,011          | 0,020          | 0,019          | 0,016          | 0,010          | 0,014          |
|       | Redução (%) | 91,3           | 80,1           | 96,8           | 95,1           | 93,4           | 93,3           | 96,8           | 94,2           |

Obs.: mg/sem = miligrama por semana



**Figura 5.22** – Redução de cargas de metais pesados do lixiviado na Fase 4

## 5.6. Dinâmica da população de minhocas

### 5.6.1. Fase 1

Na tabela A.39 do Anexo A é apresentada a dinâmica da população de minhocas inoculadas em cada leira de vermicompostagem, na Fase 1. Em função do peso de minhocas necessária para a degradação do substrato de cada leira, foi contado o número de minhocas inoculadas em cada leira no início da fase. No encerramento, procedeu-se a contagem dos indivíduos e sua pesagem. Para fins de contagem, as minhocas foram divididas em indivíduos adultos e jovens. Na tabela A.39 é apresentado também o número de casulos encontrados em

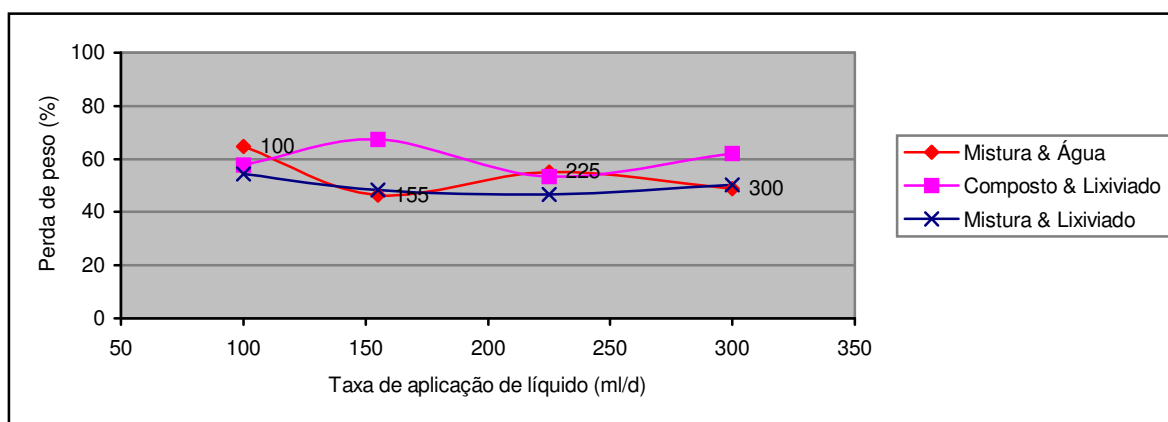
cada leira ao fim do experimento.

Na tabela 5.34 é apresentado o peso *per capita* de minhocas em cada leira no início e no encerramento desta fase. No encerramento foi realizada contagem e pesagem de indivíduos adultos e os jovens (vermes que nasceram durante o período de experimentação).

**Tabela 5.34** – Peso médio *per capita* das minhocas durante a Fase 1

| Leira | Peso por minhoca (g) |                 |       | Perda de peso por indivíduo (%) |       |
|-------|----------------------|-----------------|-------|---------------------------------|-------|
|       | No início            | No encerramento |       | Adultas                         | Total |
|       |                      | Adultas         | Total |                                 |       |
| V1    | 0,47                 | 0,21            | 0,19  | 54,3                            | 59,6  |
| V2    | 0,53                 | 0,19            | 0,11  | 64,8                            | 79,8  |
| V3    | 0,56                 | 0,24            | 0,18  | 57,7                            | 66,8  |
| V4    | 0,48                 | 0,25            | 0,19  | 48,3                            | 60,0  |
| V5    | 0,48                 | 0,26            | 0,15  | 46,3                            | 69,3  |
| V6    | 0,56                 | 0,18            | 0,16  | 67,5                            | 71,3  |
| V7    | 0,45                 | 0,24            | 0,21  | 46,7                            | 53,3  |
| V8    | 0,47                 | 0,21            | 0,15  | 55,0                            | 67,4  |
| V9    | 0,55                 | 0,26            | 0,22  | 53,4                            | 59,3  |
| V10   | 0,44                 | 0,22            | 0,20  | 50,2                            | 54,8  |
| V11   | 0,44                 | 0,22            | 0,17  | 48,7                            | 59,8  |
| V12   | 0,61                 | 0,23            | 0,19  | 62,0                            | 69,0  |

Considerando-se o peso médio das minhocas adultas, nota-se que houve perda de peso em todas as leiras, com uma diminuição média de 55 % no peso *per capita*. Considerando o número total de indivíduos no final, esta perda de peso foi maior ainda, obviamente em função do pequeno peso dos vermes jovens.



**Figura 5.23** – Perda de peso por minhocas adultas para diferentes taxas de rega na Fase 1

Na figura 5.23 são apresentadas as perdas médias de peso das minhocas para as

combinações de substrato e líquido de rega utilizados, em relação as quatro taxas de rega utilizadas. Os resultados mostram não haver uma correlação definida entre taxa de aplicação de líquido e perda de peso dos vermes, sendo que leiras com taxas maiores tiveram menores perda de peso em alguns casos.

O tipo de líquido de rega (água deionizada ou lixiviado) também não teve relação constante em relação ao desempenho das minhocas, pois das quatro taxas utilizadas, em duas delas (100 e 225 ml/d) as minhocas em leiras que receberam água tiveram maior perda de peso; e outras duas (155 e 300 ml/d), as que receberam lixiviado.

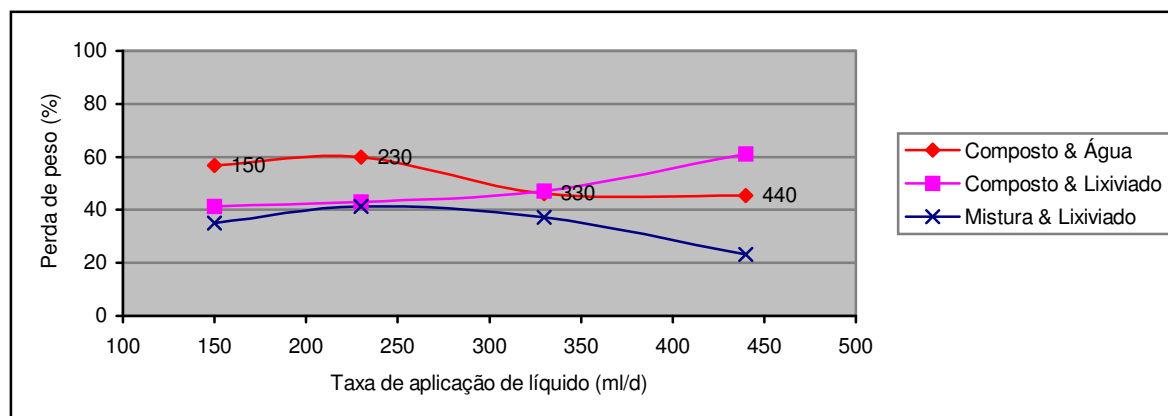
Quanto aos substratos utilizados, evidenciou-se uma clara vantagem da mistura sobre o composto. Para as leiras que receberam a aplicação de lixiviado, por exemplo, a média de perda de peso pelas minhocas foi de 49,9 e 60,2 % de perda para as leiras com mistura e com composto, respectivamente.

### 5.6.2. Fase 3

Como descrito anteriormente para a Fase 1, na tabela A.40 do Anexo A é apresentada a dinâmica da população de minhocas presentes em cada leira de vermicompostagem, na Fase 3. A tabela 5.35 apresenta o peso *per capita* de minhocas em cada leira no início e no encerramento desta fase. No encerramento foi realizada contagem e pesagem de indivíduos adultos e os jovens.

**Tabela 5.35** – Peso médio *per capita* das minhocas durante a Fase 3

| Leira | Peso por minhoca (g) |                 |       | Perda de peso por indivíduo (%) |       |
|-------|----------------------|-----------------|-------|---------------------------------|-------|
|       | No início            | No encerramento |       | Adultas                         | Total |
|       |                      | Adultas         | Total |                                 |       |
| V13   | 0,82                 | 0,53            | 0,44  | 35,1                            | 47,0  |
| V14   | 0,93                 | 0,55            | 0,55  | 41,2                            | 41,2  |
| V15   | 0,89                 | 0,52            | 0,46  | 41,3                            | 48,5  |
| V16   | 0,97                 | 0,55            | 0,55  | 42,9                            | 42,9  |
| V17   | 1,03                 | 0,65            | 0,61  | 37,1                            | 41,0  |
| V18   | 0,91                 | 0,48            | 0,48  | 47,2                            | 47,2  |
| V19   | 0,83                 | 0,64            | 0,45  | 23,3                            | 45,2  |
| V20   | 0,88                 | 0,34            | 0,34  | 61,0                            | 61,0  |
| V21   | 0,92                 | 0,40            | 0,36  | 56,8                            | 60,9  |
| V22   | 0,91                 | 0,37            | 0,37  | 59,8                            | 59,8  |
| V23   | 0,88                 | 0,48            | 0,44  | 46,1                            | 50,4  |
| V24   | 1,03                 | 0,56            | 0,52  | 45,4                            | 49,3  |



**Figura 5.24** – Perda de peso por minhocas adultas para diferentes taxas de rega na Fase 3

Nesta fase, com leiras de maior altura e que receberam injeção de ar, também houve redução do peso *per capita* em todas as leiras estudadas. Da figura 5.24 pode-se notar que as leiras com composto como substrato e que receberam o lixiviado como líquido de rega, houve uma maior perda de peso pelas minhocas a medida que as taxas de aplicação de lixiviado eram aumentadas. Já nas leiras com mistura como substrato, recebendo o lixiviado como líquido de rega, houve um pequeno aumento na porcentagem de perda de peso, para a taxa de 230 ml/d, seguido de uma diminuição para as duas taxas maiores. As leiras com composto e que receberam água como rega, tiveram comportamento semelhante as últimas.

Assim como o verificado na Fase 1, o fator preponderante no desempenho das minhocas foi o substrato utilizado, com a mistura apresentando as menores perdas de peso das minhocas. Nesta fase, nas leiras com composto que foram regadas com lixiviado, não foram encontradas minhocas jovens após o encerramento.

## **6. DISCUSSÃO**

### **6.1. Concentrações nos substratos sólidos**

Conforme consta no Anexo A, nas Fases 1, 3 e 4 foram realizadas análises de caracterização dos substratos colocados em cada leira. Nas fases em que havia minhocas (1 e 3) foram retiradas três amostras de cada leira (no início, no meio e no encerramento da fase) e na Fase 4 apenas ao início e no encerramento.

O pH dos substratos de todas as leiras analisadas ficou dentro da faixa ótima para a vermicompostagem, de 5,5 a 8,5, conforme apontado por HARTENTEIN apud APPELHOF (1981).

A variação média da relação C/N nas Fases 1 e 3, fases com as minhocas, no início da experimentação foi entre 11,7 e 15,4, tendo a mistura apresentado uma relação maior que o composto. Estes valores ficam entre os valores considerados ótimos segundo CETESB (1987) e KNÄPPER (1990). Ao contrário da vermicompostagem convencional, onde ocorre uma diminuição da relação C/N ao longo do processo, atingindo até C/N igual a 5 no vermicomposto final, na Fase 1 desta pesquisa verificou-se um aumento nesta relação, que chegou após 60 dias, em até um valor máximo de 16,7 para a média das relações C/N das quatro leiras com mistura como substrato. Na Fase 3 verificou-se uma pequena diminuição da relação C/N ao longo da experimentação, resultando em 12,6, 12,0 e 11,4 respectivamente para as leiras com mistura e lixiviado, composto e lixiviado, e composto e água.

Atribui-se esta pouca variação da relação C/N, do início ao final da experimentação, à não completa humificação dos substratos em função das condições adversas a que as minhocas foram submetidas, e ao aporte contínuo de matéria orgânica (carbono) e nitrogênio devido à aplicação diária do lixiviado. Os fatores que propiciaram condições adversas ao desenvolvimento das minhocas serão discutidos no item 6.2.

Os resultados mostram que todas as leiras apresentavam faixas ideais de rela-

ção C/N para a vermicompostagem. Este parâmetro não foi, portanto, fator limitador do desenvolvimento das minhocas em nenhum momento da pesquisa.

Os macro e micronutrientes analisados também se mostraram razoavelmente constantes ao longo da realização da experimentação. Verificou-se que a concentração destes nutrientes sempre foi maior nas leiras com mistura, em relação ao composto, confirmando a vantagem deste tipo de substrato para o desenvolvimento das minhocas, conforme relatado por HAND e HAYES (1983) e KIEHL (1985).

Os metais pesados chumbo, cádmio e níquel mantiveram suas concentrações nas leiras do início para o final da experimento. O cromo, invariavelmente, teve sua concentração aumentada do início ao final de cada fase. Como houve redução na concentração de metais no percolado efluente, conclui-se que ocorreu aprisionamento no âmbito da própria leira, ao longo da profundidade. Variações nas concentrações de metais podem ser atribuídas a problemas de amostragem nas leiras e às baixíssimas concentrações destes, tanto nos substratos como no lixiviado utilizados.

## **6.2. Dinâmica das minhocas**

As duas fases em que a vermicompostagem foi realizada com a aplicação do lixiviado (Fases 1 e 3), apresentaram perda de peso médio das minhocas. Considerando somente as minhocas adultas, esta perda foi menor na Leira V19 (23,3 %) e maior na Leira V6 (67,5 %). Na Fase 1, as leiras V1, V2, V4, V7, V8 e V11 apresentaram mais minhocas adultas no final do que no início do experimento. Na Fase 3, nas leiras V13 e V15 o número de minhocas no início e ao final foi igual, e nas demais leiras, menor ao final. A diminuição do número de indivíduos, é resultante da fuga e morte das minhocas, demonstrando terem as mesmas encontrado um meio inóspito para o seu desenvolvimento, fato este também corroborado pela perda de peso dos vermes.

Discutir-se-á a influência de quatro fatores sobre a dinâmica das minhocas: o substrato, o líquido de rega, a taxa de aplicação de líquido e a aeração.

Os resultados obtidos mostram claramente que houve uma diferenciação entre os dois tipos de substratos. Considerando-se a perda média de peso das minhocas para cada tipo de substrato, conforme tabelas 5.34 e 5.35, e figuras 5.23 e 5.24, tem-se que tanto na Fase

1 como na Fase 3, o substrato mistura apresentou as menores perdas de peso pelas minhocas, o que já era esperado, uma vez que a mistura enriquecida com esterco oferece melhores condições nutritivas às minhocas. Considerando as perdas médias de peso das minhocas para as quatro leiras com os mesmos substratos em cada fase, tem-se que para mistura as perdas foram de 49,9 e 34,2 %, e para composto de 60,2 e 48,1 %, respectivamente para as Fases 1 e 3. Considerando o número de indivíduos no início e ao final da experimentação, a superioridade da mistura também se comprova, principalmente na Fase 3.

Os resultados obtidos não mostram uma diferenciação evidente sobre o desempenho das minhocas em função do tipo de líquido de rega utilizado. Na Fase 1, para as quatro taxas de rega utilizadas, duas apresentaram maior perda para o lixiviado e duas para a água, alternadamente. Na média, os valores para os tipos de rega são muito parecidos; sendo que na Fase 1 as perdas de peso foram de 53,7 e 49,9 % para rega com água e com lixiviado, respectivamente. Na Fase 3, as leiras que receberam lixiviado apresentaram menores perdas para as duas taxas de rega mais baixas, perdas iguais para a taxa de 300 ml/d, e uma perda maior na leira que recebeu lixiviado para a taxa maior. As leiras que receberam água nesta fase, tiveram uma perda de peso de minhocas de 52 %, e com lixiviado, 48,1 %. Este resultado é surpreendente, uma vez que se esperava uma toxicidade maior do lixiviado em relação às leiras que foram regadas somente com água deionizada.

O fato de se ter utilizado lixiviado de aterro velho, que já passou por um tratamento anaeróbio no próprio aterro, e que apresentava pH na faixa da neutralidade, baixa carga orgânica, e baixas concentrações de metais pesados, pode ser a razão para a não toxicidade do lixiviado às minhocas neste estudo. As concentrações de nitrogênio, bastante elevadas no lixiviado, também não se mostraram tóxicas ao desenvolvimento das minhocas.

Quanto à influência da taxa de rega sobre as minhocas, não se estabeleceu uma relação clara entre aumento nas taxas e a perda de peso das minhocas. Entretanto, todas as leiras, independentemente do substrato e do tipo de líquido de rega, tiveram perda de peso unitário das minhocas, variando esta perda entre 23,3 % na leira V19 (Fase 3) e 67,5 % da leira V6 (Fase 1).

A umidade das leiras foi verificada no final de cada fase, no último dia. As leiras com mistura como substrato, apresentaram umidade semelhante nas duas fases, ficando o valor médio em 47,3 % na Fase 1, e em 48,7 % na Fase 3. As leiras com composto, tiveram umidade média de 39,9 e 28,5 % nas Fases 1 e 3, respectivamente. Estes valores de umidade

situam-se dentro da faixa recomendada como ideal por vários autores brasileiros. BIDONE (1995) não verificou problemas na vermicompostagem de resíduos de curtume para umidade variando entre 7,2 e 67,2 %. Valores ideais de 40 e 43 % de umidade são recomendados por VERAS (1996) e COUTINHO (1996), respectivamente.

As amostras para determinação da umidade foram retiradas na última semana de experimentação de cada fase. Como as amostras foram retiradas da camada superior de substrato, estes valores podem não ser representativos da umidade média de todo o perfil vertical das leiras.

Além disso, as amostras de substrato para análise do teor de umidade foram retiradas cerca de 6 h após a realização da última rega. Como mais de 90 % do percolado efluente retirado pela base das leiras era verificado nas primeiras 2 ou 3 h após a realização da rega, estes valores de umidade correspondem ao estado de umidade de um determinado momento, não sendo necessariamente a umidade média das leiras ao longo do dia, muito menos a umidade máxima verificada. Na realidade, com exceção das leiras que receberam uma aplicação de líquido de 150 ml/d, todas as demais tiveram grande volume de percolado efluente. Para a ocorrência deste percolado, foi necessário que estas leiras ficassem saturadas num primeiro momento. Este período diário de saturação com líquido correspondia ao tempo de geração do maior volume de percolado, as cerca de 2 ou 3 h.

Estes ciclos de saturação aos quais as leiras eram diariamente submetidas, devido a sistemática de rega, por si só não podem ser responsabilizados pela perda generalizada de peso das minhocas. No entanto, BIDONE (1995) descreve que em ambientes saturados o CO<sub>2</sub> resultante da respiração dos vermes e do processo de degradação dos substratos e do lixiviado, fica aprisionado na instância da leira. O excesso de CO<sub>2</sub>, torna o ambiente inóspito às minhocas, que são organismos aeróbios. Esta parece ser a razão da perda de peso unitária dos vermes, e também das fugas e mortes verificadas nas primeiras semanas.

Do ponto de vista do desenvolvimento das minhocas, todas as taxas foram muito elevadas, saturando ciclicamente as leiras. Utilizando recipientes semelhantes em forma e com volume de substrato cerca de 2,5 vezes maior que os utilizados na Fase 1 desta pesquisa, BIDONE (1995) aplicou inicialmente uma taxa de 130 ml/d sobre cada leira, passando em seguida para 130 ml a cada três dias, em função do excesso de umidade verificado. Outros experimentos, utilizando a vermicompostagem no tratamento de resíduos sólidos, fornecem



somente o volume de água necessário para as condições de umidade ótima para o desenvolvimento das minhocas.

Neste estudo, as elevadas taxas de rega utilizadas, somada a sistemática de rega concentrada em um único momento no dia, podendo ter causado estresse às minhocas, foram as causas da fuga, morte, e perda de peso das mesmas.

Na Fase 3, os vasos cerâmicos com diâmetro de 20 cm e altura de 60 cm tiveram a injeção de ar na sua metade inferior. As leiras V13, V14 e V21, que receberam a taxa de 150 ml/d, quase não tiveram geração de percolado, apresentando uma retenção de volume de 98,1, 93,3 e 100 % em relação ao volume aplicado, respectivamente. Estas leiras apresentaram teor de umidade similar as demais leiras desta fase. No entanto, o fundo dos vasos se encontrava muito seco, estando as minhocas concentradas, exclusivamente, na parte superior dos mesmos. Nas outras leiras, ocorreu a geração de efluente pela base, indicando que também houve, como na Fase 1, a saturação do substrato por um período curto de tempo, ao longo de cada ciclo de 24 horas.

A utilização de leiras de maior profundidade parece ser uma alternativa interessante, uma vez que nas leiras de 60 cm, com o dobro da profundidade usual de 30 cm (BIDONE, 1995), o desenvolvimento das minhocas na Fase 3 foi semelhante à Fase 1 (com leiras rasas). As leiras profundas com injeção de ar na metade inferior, inclusive tiveram desempenho um pouco superior, com as minhocas adultas apresentando uma perda média de 45 %, inferior a perda de 55 % da Fase 1.

### **6.3. Lixiviado bruto afluente**

O lixiviado bruto utilizado para a rega das leiras era proveniente de um aterro relativamente velho, comprovado pela baixa carga orgânica do mesmo. Os valores médios da DQO nas quatro fases da pesquisa variaram entre 860 e 1.335 mg/L.

A tentativa realizada na Fase 1, de fazer uma única coleta de lixiviado no aterro, preservando-o sob refrigeração, fazendo a rega com este mesmo lixiviado ao longo de toda a Fase, teve como objetivo conseguir a menor variação possível nas características do lixiviado afluentes às leiras em cada semana. No entanto, embora a DQO tenha se mantido estável, ocorreu grande variação na DBO e nas concentrações das formas de nitrogênio nas três incur-

sões realizadas (Tab. A.6). A DBO, inicialmente muito próxima da DQO, relação DBO/DQO de 0,88, é atípica para lixiviado de aterros velhos. Não se descarta um erro de análise da DBO na primeira incursão da Fase 1. De qualquer modo, a queda brusca da DQO, a queda na concentração de nitrogênio total e o aumento da concentração de nitrato, mostra de forma clara que houve degradação do lixiviado armazenado em geladeira.

Nas Fases 2, 3, e 4 o lixiviado afluyente foi renovado quinzenalmente. Todas as amostras apresentaram baixa carga orgânica, baixa relação DBO/DQO, elevadas concentrações de NTK e baixas concentrações de nitrato. Estas são características típicas de lixiviados de aterro velhos, e que ainda não foram submetidos a nenhum tipo de tratamento aeróbio.

Em todas as fases da pesquisa, as concentrações de metais pesados foram extremamente baixas. Estas baixas concentrações podem ser explicadas pela lixiviação ocorrida nos primeiros anos de vida do aterro e, principalmente, pela diminuição da solubilização dos íons metálicos em aterros mais antigos, a medida que o pH do ambiente tende a aumentar (GANDOLLA *et al.* 1995).

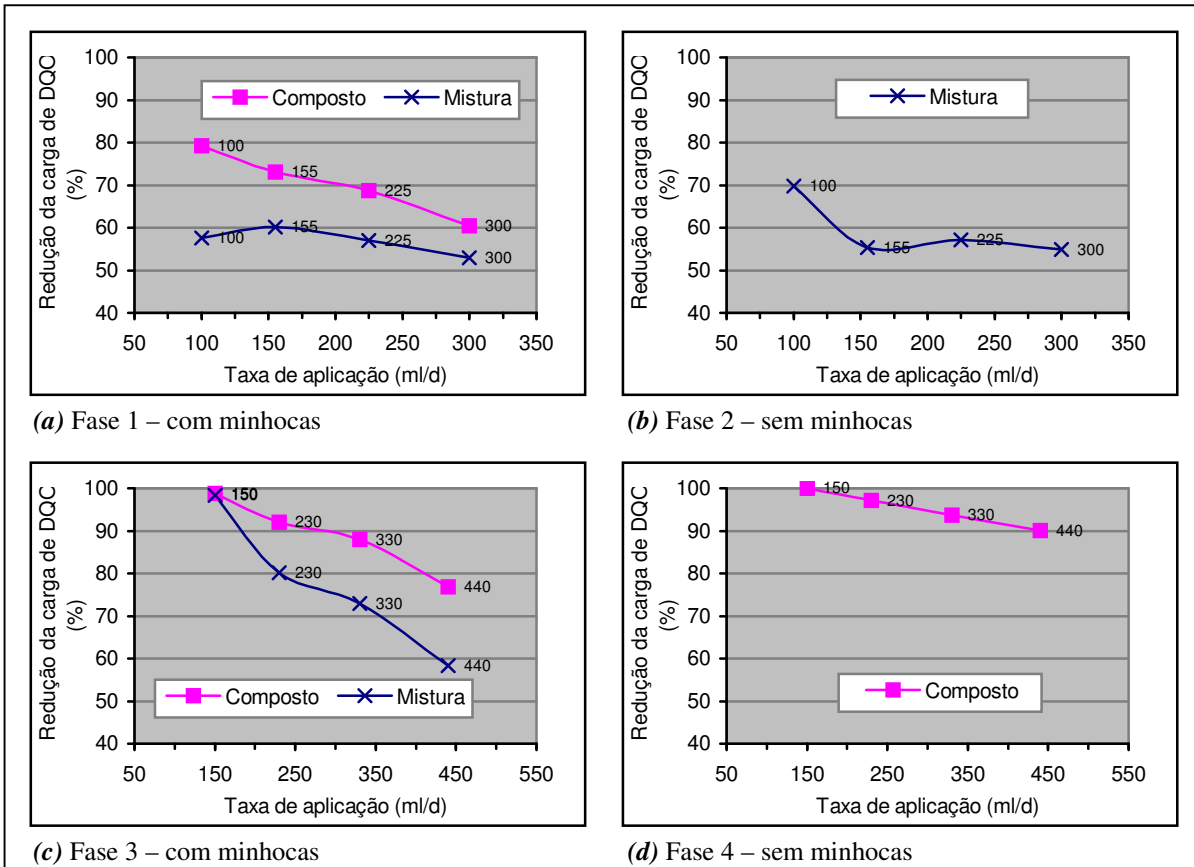
Segundo LU *et al.* (1984) apud QASIN e CHIANG (1994) com a idade do aterro ocorre um decréscimo dos ácidos voláteis no lixiviado gerado. As baixas concentrações de ácidos voláteis encontrados no lixiviado afluyente, confirmam ser este oriundo de aterro velho. O ácido acético foi o mais comumente encontrado, mas sempre em baixas concentrações, apresentando maior média na Fase 3, de 2,7 mg/L. Ou outros ácidos, não foram detectados na maioria das amostras de lixiviado bruto afluyente.

## **6.4. Eficiências na remoção/atenuação de poluentes**

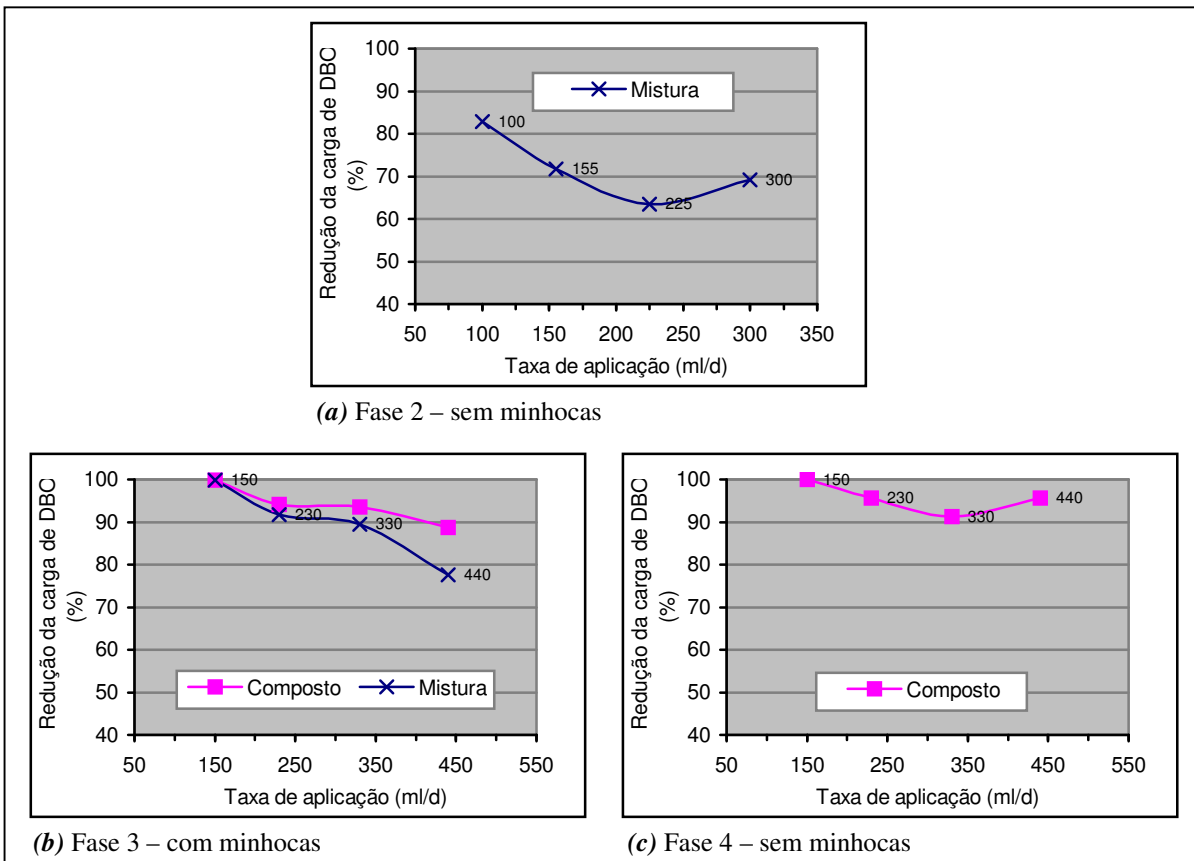
### **6.4.1. Carga orgânica (DQO e DBO)**

Os resultados obtidos durante a realização das quatro fases do experimento, mostraram a efetiva eficácia do processo utilizado para a remoção/atenuação da carga orgânica do lixiviado utilizado como líquido de rega.

Nas figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os valores médios de DQO e DBO, respectivamente, para cada leira ao longo de cada fase da pesquisa. A Fase 1 não teve seus dados de DBO computados pela grande variação deste parâmetro durante o armazenamento do lixiviado afluyente.



**Figura 6.1** – Eficiência de remoção de carga de DQO para as diferentes taxas de aplicação



**Figura 6.2** – Eficiência de remoção de carga de DBO para as diferentes taxas de aplicação

Houve diminuição da eficiência de redução da carga orgânica com o aumento da taxa de aplicação. Como as concentrações nos efluentes não sofrem grande influência das taxas de aplicação utilizadas, conclui-se que estas menores eficiências devem-se a maior lixiviação ocorrida com o aumento das taxas. As fases onde a aplicação do lixiviado deu-se concomitantemente com a vermicompostagem (Fases 1 e 3) mostraram-se mais sensíveis ao aumento da taxa de aplicação do que as leiras somente com o húmus (sem as minhocas).

Tanto para DQO como para DBO, as leiras com composto como substrato apresentaram melhor desempenho em relação às com mistura. Fazendo a média por substrato, para as quatro taxas de aplicação de cada fase, tem-se que na Fase 1 a remoção de DQO média nas leiras com composto foi de 70,4 %, enquanto que nas leiras com mistura, foi de 56,6. Na Fase 3, os valores foram de 88,9 e 77,5 % para composto e mistura, respectivamente.

Talvez uma das razões que tenham contribuído para isto, é o fato de o composto estar inicialmente mais estabilizado do que a mistura, estando assim menos susceptível ao processo de lixiviação de seus constituintes orgânicos.

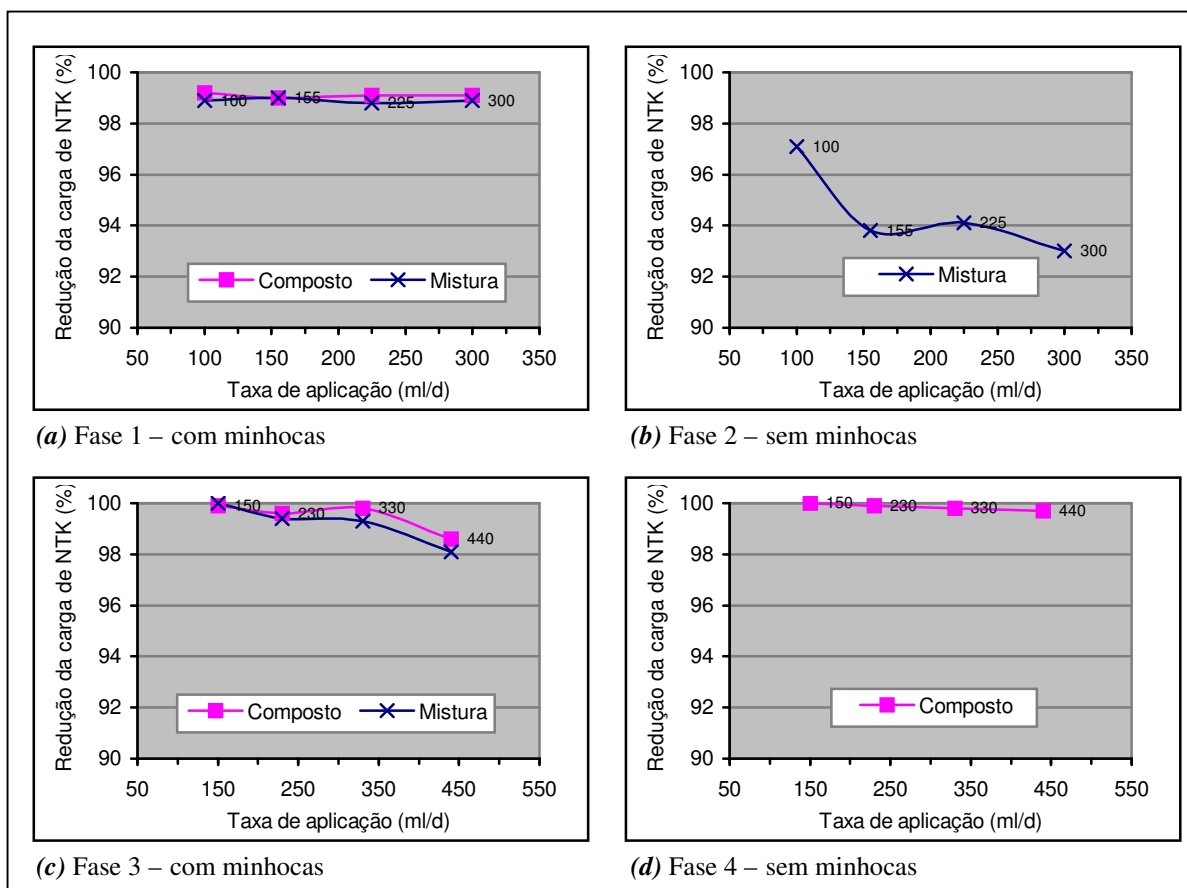
As fases em que as minhocas não estavam presentes (Fases 2 e 4), apresentaram desempenho um pouco superior em relação às outras duas, demonstrando que a presença das minhocas, ao revolver e adiantar o estado de degradação do substrato, facilitam a lixiviação dos constituintes orgânicos, presentes no substrato e no lixiviado afluente. Nas leiras com insuflamento de ar, a média com a minhocas foi de 88,9 % de remoção de DQO, e nas leiras sem as minhocas, foi de 95,2 %.

O aumento da altura das leiras, com o insuflamento de ar na metade inferior dos vasos, mostrou ser uma alternativa interessante para aumentar a remoção da carga orgânica do lixiviado. Para a taxa de aplicação mais baixa, de 150 ml/d nas Fase 3 e 4, a redução de carga orgânica foi 100 %, uma vez que não houve a geração de percolato nas leiras com esta taxa de rega.

Analisando os resultados para as fases com a presença das minhocas, e as onde o lixiviado foi aplicado somente sobre o húmus, tem-se que estes últimos tiveram um desempenho superior. Este fato pode ser atribuído ao trabalho das minhocas, que condicionaram os substratos sólidos e facilitaram a ação dos microrganismos. Possivelmente esta eficiência seria maior ainda se a preparação do húmus fosse realizada com taxas de rega mais baixas, evitando assim o estresse a que as minhocas foram expostas durante as fases anteriores.

### 6.4.2. Nitrogênio

Na figura 6.3 são apresentadas as reduções percentuais das cargas de nitrogênio, nas quatro fases, para as distintas taxas de aplicação de lixiviado e para os diferentes substratos utilizados.



**Figura 6.3** – Eficiência de remoção de carga de NTK para as diferentes taxas de aplicação

O nitrogênio presente no lixiviado afluente estava quase que completamente na forma amoniacal, sendo o NTK praticamente igual a concentração do íon amonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Embora o lixiviado afluente apresentasse altas concentrações de NTK, todas as fases mostraram excelente remoção deste parâmetro. Com exceção da Fase 2, as outras tiveram remoção sempre superior a 98 %, sem diferenças significativas para os diferentes substratos sólidos e as distintas taxas de aplicação do lixiviado.

A Fase 2, com leiras de menor altura, sem a presença das minhocas, e sem insuflamento de ar, embora com redução da carga de NTK superior a 92 %, apresentou desempenho abaixo das demais fases. Esta pequena perda de eficiência para remoção do NTK nesta fase, pode ser atribuída às saturações cíclicas a que as leiras eram submetidas, quando por um

período curto de tempo a presença do oxigênio era reduzida pelo excesso de umidade. Nas leiras das Fases 1 e 3, a presença das minhocas favoreciam a oxigenação do substrato; e na Fase 4, a oxigenação era feita artificialmente. Desta forma, nestas três fases a oxigenação necessária para a remoção do NTK era garantida.

A remoção da amônia foi um dos aspectos mais positivos da pesquisa. Uma alta performance neste aspecto já era esperada, uma vez que são necessárias condições aeróbias para que isto ocorra, e estas condições de aerobiose são fundamentais também para os processos de vermicompostagem.

As concentrações de nitrato nos percolados efluentes demonstram ter havido uma efetiva nitrificação no processo. Virtualmente ausente no lixiviado afluente, o nitrato aparece em grandes concentrações nos percolados, chegando a concentrações na ordem de até 1.400 mg/L.

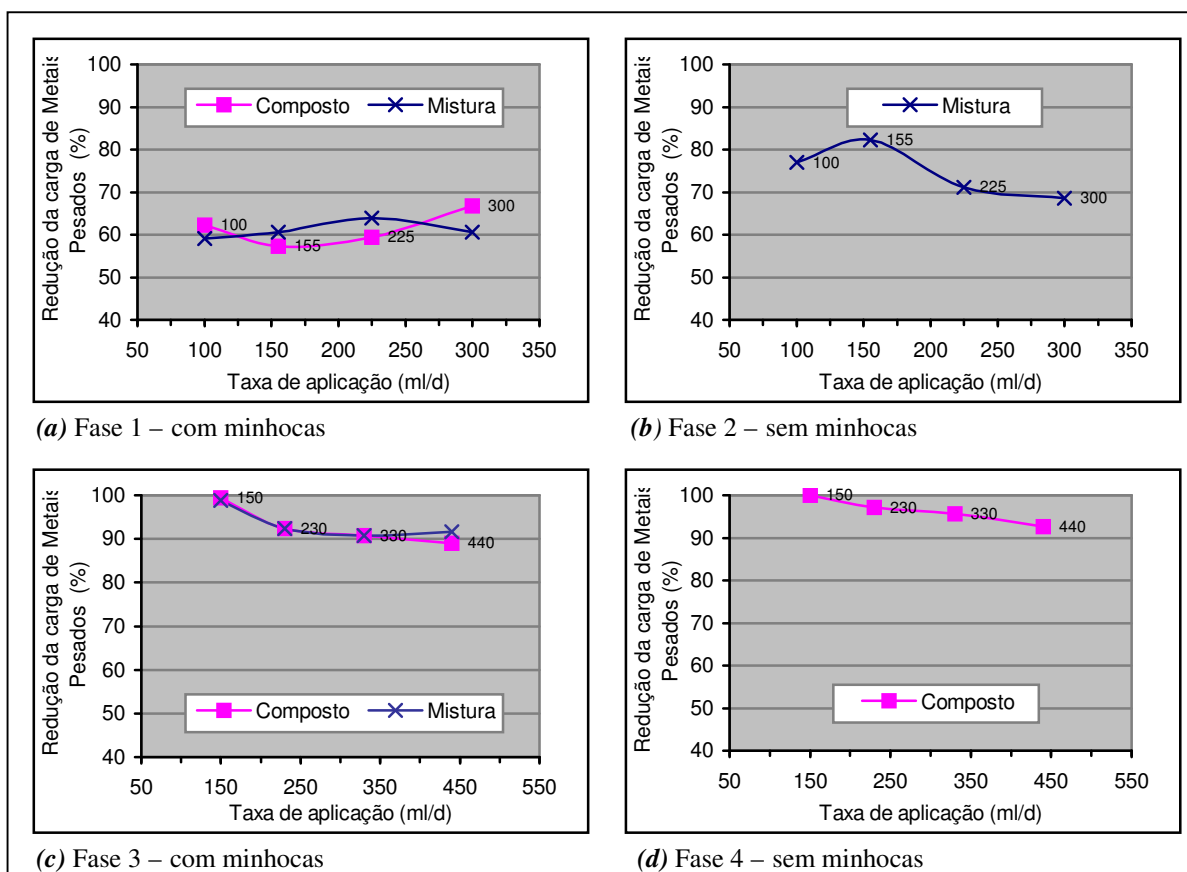
AKESSON e NILSSON (1997) afirmam que a relação ótima de  $DBO/NH_4^+$  para a remoção do íon amonium pela assimilação biológica, em lagoas aeradas, está entre 20 a 28 g/g. Neste estudo esta relação foi superior a 1 (um) na maioria das vezes, mesmo assim, a remoção da amônia não foi afetada. Uma das razões para esta redução da carga de amônia é a apontada por KIEHL (1985), a retenção da amônia pelo húmus. O íon amonium, carregado positivamente, fica retido eletrostaticamente pelas cargas negativas das micelas coloidais húmicas.

#### **6.4.3. Metais pesados**

As eficiências de redução das cargas de metais pesados são apresentados na figura 6.4 para a soma das cargas dos metais Pb, Ni, Cd e Cr.

De maneira geral todas as fases tiveram boa redução da carga de metais pesados ao longo da experimentação.

Assim como no caso da remoção de nitrogênio, e ao contrário à redução da carga orgânica, não foi verificada diferenciação na eficiência de redução da carga de metais pesados para os dois tipos de substratos sólidos utilizados.



**Figura 6.4** – Eficiência de remoção de carga de metais pesados para as diferentes taxas de aplicação

As Fases 2 e 4, com substrato já vermicompostado (húmus) e sem as minhocas, tiveram menores cargas percoladas de metais do que as mesmas leiras que receberam a aplicação de lixiviado durante o processo de vermicompostagem (Fases 1 e 3). Isto confirma as características do húmus ou vermicomposto descritas por BIDONE e POVINELLI (1996), ou seja, suas excelentes capacidades adsorptivas e quelantes. A micela coloidal orgânica, de grande área específica, sendo carregada por cargas negativas, retém íons positivos, tipo os metais pesados; ao mesmo tempo, complexa metais, que ficam tão fortemente aprisionados (efeito quelante), que a sua extração só é conseguida em procedimentos de laboratório.

As leiras de maior altura (Fases 3 e 4) tiveram melhor desempenho na redução de carga de metais, com reduções superiores a 90 %. Como estas leiras tinham o dobro da altura das leiras das Fases 1 e 2, o lixiviado aplicado percolava ao longo de toda esta coluna de vermicomposto, estando assim por um maior tempo em contato com o húmus, e consequentemente, com o seu efeito adsorptivo e quelante.

#### 6.4.4. Ácidos voláteis

Os ácidos orgânicos voláteis são formados num estágio anterior a metonogênese no processo de digestão anaeróbio em aterros sanitários (REES, 1980; REES e VINEY, 1982; LIMA, 1986; POHLAND e HARPER, 1985 apud GOMES, 1989). Estão portanto em maiores concentrações em lixiviados de aterros jovens.

As eficiências observadas na redução de ácidos voláteis foram bastante baixas, não por deficiência do processo proposto para a remoção destes ácidos, mas sim por estarem os mesmos presentes em baixas concentrações já no lixiviado afluente, em função da origem deste lixiviado, que era proveniente de células antigas de aterro sanitário.

#### 6.4.5. Comparação entre as quatro fases

Tomando com base os valores médios de redução de cargas por substrato, apresentados nas tabelas D.5 a D.8 do Anexo D, e nas figuras 6.1 a 6.4, resulta:

- para redução de carga de DQO, as leiras com composto tiveram desempenho superior às com mistura; assim como as leiras de maior altura e com insuflamento de ar tiveram maior eficiência de remoção de cargas em relação às leiras das Fases 1 e 2, para ambos os substratos. Comparando os mesmos substratos em fases com e sem as minhocas, nas leiras sem as minhocas o desempenho foi um pouco superior, na ordem de 4 % nas leiras baixas, e de 6 % nas leiras com vasos de maior altura. A menor média de remoção foi de 56,9 % para a Fase 1 com mistura, e maior de 95,2 % para a Fase 4 com composto;

- também para DBO as leiras com composto apresentaram desempenho superior, assim como as leiras de maior altura. No entanto, nas Fases 3 e 4 não se verificou diferença entre as leiras com e sem minhocas. Nas leiras de menor altura, esta comparação não foi possível, pois os dados de DBO da Fase 1 não foram analisados, em função do exposto no item 5.2.4 desta dissertação;

- a menor redução média de carga de NTK foi de 94,5 % para a Fase 2 onde o substrato era mistura. Para todos os outros substratos em todas as fases, a eficiência média foi da ordem de 99 %;

- para a eficiência de remoção da soma de cargas dos metais Pb, Cd, Ni e Cr a variação da média variou de 61,6 % para mistura da Fase 1, a 96,4 % no composto com aera-



ção na Fase 4. Os diferentes substratos, dentro de cada fase, apresentaram comportamentos semelhantes em relação a remoção da carga de metais. As leiras de maior altura e com insuflamento de ar, tiveram desempenho superior às de menor altura. Nas leiras de menor profundidade, as leiras sem minhocas (Fase 2) tiveram eficiência 13,7 % superior à média das leiras com minhocas.

### **6.5. Análise das taxas de aplicação de lixiviado utilizadas**

As leiras das Fases 1 e 2 eram constituídas de vasos plásticos com 20 cm de altura e 7,5 litros de substrato. As taxas de rega foram definidas em função da chuva média de Porto Alegre, tomando-se uma taxa igual a esta chuva sobre a superfície do vaso, e duas taxas superiores e uma inferior àquele valor. Esta taxa em mililitro por dia, em litro por metro quadrado da superfície da leira e em litro por metro cúbico de substrato, estão apontadas na tabela 4.2.

Nas Fases 3 e 4, foram utilizados vasos cerâmicos de 60 cm de profundidade, e com volume de 11 litros. A taxa de rega nestas fases foi definida de forma a manter a mesma taxa volumétrica (litro por metro cúbico de substrato); obtendo-se assim taxas de aplicação superficial até quatro vezes superior as taxas superficiais das fases anteriores, conforme se pode observar na tabela 4.3.

Das tabelas A.41 e A.42 tem-se os seguintes valores médios de retenção de lixiviado na instância da leira ao longo de cada Fase da experimentação: 10,2 % para mistura e 14,9 % para composto na Fase 1; 21,7 % para as leiras com mistura da Fase 2; 62,7 % para mistura e 60,7 % para composto na Fase 3; e 73,6 % para composto da Fase 4.

Verifica-se comportamento semelhante em relação à retenção do lixiviado nas leiras para os dois tipos de substrato. No entanto, tanto para os vasos plásticos quanto para os cerâmicos, as fases com as minhocas tiveram uma menor retenção de líquido – maior volume percolado, obviamente em função dos canais feitos pelas minhocas que facilitavam a percolação do lixiviado.

Nos vasos cerâmicos a percolação pela base, em termos percentuais, foi de 3 a 4 vezes menor que nos vasos plásticos, possivelmente pelo maior volume de substrato disponível nestes vasos, e em razão do insuflamento mecânico de ar pela base, que pode ter contri-

buído para aumentar a evaporação. Nas leiras de 60 cm de altura obteve-se percolações tão baixas como 6,7 % na leira V14, 0,9 % na leira V13 na Fase 3, ou até mesmo geração de percolado nulo (retenção de 100 %) na leira V21 da Fase 4.

Em suma, tem-se que não foi verificada alteração na concentração dos parâmetros analisados no percolado efluente em função do incremento das taxas de rega. Por outro lado, todas as taxas, em todas as fases ocasionam perda de peso das minhocas. Os resultados demonstram claramente que há uma diminuição da eficiência de remoção de carga orgânica com o aumento das taxas, o mesmo não acontecendo para NTK e metais pesados, o que também foi confirmado pela análise estatística (ver Tab. 6.2).

## 6.6. Análise estatística

A análise estatística realizada é simplificada, restringindo-se a análise de médias de redução de cargas e a variabilidade dos valores em relação a esta média, através do cálculo do coeficiente de variação ( $C_v$ ).

Nas tabelas D.1 a D.4 são apresentados os resultados da análise de médias e coeficientes de variação, para as eficiências de redução de cargas de DQO, DBO, NTK e soma de metais (Pb, Cd, Ni e Cr), respectivamente. A análise foi realizada por leira, ou vaso, ao longo das oito ou dez semanas de experimentação, dependendo da fase.

Na tabela 6.1 é apresentado o agrupamento de variabilidade dos resultados semanais em relação à média, de acordo com o descrito em 4.8. Neste caso, uma baixa variabilidade em relação à média indica que a eficiência foi constante naquela leira em todas as semanas da pesquisa, ao passo que na medida que o  $C_v$  vai aumentando, ocorreu uma maior variação em torno da média.

Para redução de carga de NTK no percolado, todas as quatro fases apresentaram baixa variabilidade. Já para metais, as leiras em vasos cerâmicos, Fases 3 e 4, apresentaram baixa variabilidade, e os vasos plásticos, de menor altura, apresentaram variabilidade alta e muito alta para a maioria das leiras. Para DQO e DBO, as leiras de maior altura, em vasos cerâmicos, apresentaram baixa e média variabilidade, sendo que para as leiras de menor altura, Fases 1 e 2, a variabilidade ficou entre média, alta e muito alta. Estes resultados mostram ser a altura das leiras, ou insuflamento de ar nas mesmas, um fator importante para diminuir a variabilidade nas eficiências de redução das cargas de DQO, DBO e metais.

**Tabela 6.1** – Agrupamento das leiras em função da variabilidade, em torno da média, da eficiência de redução de carga

| Parâmetro                        | Fase   | Variabilidade em relação à média          |                                |                               |                                |
|----------------------------------|--------|---|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
|                                  |        | Baixa<br>( $C_v < 10\%$ )                 | Média<br>( $10 < C_v < 20\%$ ) | Alta<br>( $20 < C_v < 30\%$ ) | Muito Alta<br>( $C_v > 30\%$ ) |
| DQO                              | Fase 1 | –   | V3, V6, V7, V9,<br>V10, V12    | V1, V4                        | –                              |
|                                  | Fase 2 | –   | –                              | –                             | V2, V5, V8, V11                |
|                                  | Fase 3 | V13, V14, V15, V16,<br>V18, V20           | V17, V19                       | –                             | –                              |
|                                  | Fase 4 | V21, V22, V23, V24                        | –                              | –                             | –                              |
| DBO                              | Fase 1 | Resultados não analisados.                |                                |                               |                                |
|                                  | Fase 2 | –   | –                              | V2                            | V5, V8, V11                    |
|                                  | Fase 3 | V13, V14, V15, V16,<br>V18                | V17, V20                       | –                             | V19                            |
|                                  | Fase 4 | V21, V22, V24                             | V23                            | –                             | –                              |
| NTK                              | Fase 1 | V1, V3, V4, V6, V7,<br>V9, V10, V12       | –                              | –                             | –                              |
|                                  | Fase 2 | V2, V5, V8, V11                           | –                              | –                             | –                              |
|                                  | Fase 3 | V13, V14, V15, V16,<br>V17, V18, V19, V20 | –                              | –                             | –                              |
|                                  | Fase 4 | V21, V22, V23, V24                        | –                              | –                             | –                              |
| Metais<br>(Pb + Cd +<br>Ni + Cr) | Fase 1 | –   | V12                            | V7, V9, V10                   | V1, V3, V4, V6                 |
|                                  | Fase 2 | V5  | –                              | V2, V8, V11                   | –                              |
|                                  | Fase 3 | V13, V14, V15, V16,<br>V17, V18, V19, V20 | –                              | –                             | –                              |
|                                  | Fase 4 | V21, V22, V23, V24                        | –                              | –                             | –                              |

“–”: indica que não houve leiras nesta faixa de variabilidade para a fase em questão.

Nas tabelas D.5 a D.8 são apresentadas as médias e os coeficientes de variação para cada tipo de substrato nas quatro taxas de aplicação de lixiviado utilizadas. Como cada taxa corresponde a uma leira, o  $C_v$  neste caso indica se houve variação para as diferentes taxas utilizadas para um mesmo tipo de substrato para cada fase.

Os resultados para as reduções de cargas dos parâmetros analisados, agrupados em função dos substratos utilizados em cada fase da pesquisa, constam na tabela 6.2.

Na tabela 6.2 vê-se que apenas para DQO, no substrato mistura na Fase 1, leiras de menor altura, ocorreu alta variabilidade das médias de cada leira para as quatro diferentes taxas de aplicação, evidenciando que houve alta influência nas eficiências de reduções de DQO para a variação das taxas de rega.

**Tabela 6.2** – Agrupamento em função da variabilidade em torno da média, da eficiência de redução de carga, tomando como base as quatro taxas de aplicação em cada substrato sólido utilizado

| Parâmetro                     | Variabilidade em relação à média  |  |                               |                                |
|-------------------------------|---|--|-------------------------------|--------------------------------|
|                               | Baixa<br>( $C_v < 10\%$ )   | Média<br>( $10 < C_v < 20\%$ )                             | Alta<br>( $20 < C_v < 30\%$ ) | Muito Alta<br>( $C_v > 30\%$ ) |
| DQO                           | Fase 1 – Mistura<br>Fase 4 – Composto   | Fase 1 – Composto<br>Fase 2 – Mistura<br>Fase 3 – Composto | Fase 3 – Mistura              | –                              |
| DBO *                         | Fase 3 – Composto<br>Fase 4 – Composto  | Fase 2 – Mistura<br>Fase 3 – Mistura                       | –                             | –                              |
| NTK                           | Fase 1 – Mistura<br>Fase 1 – Composto<br>Fase 2 – Mistura<br>Fase 3 – Mistura<br>Fase 3 – Composto<br>Fase 4 – Composto | –  | –                             | –                              |
| Metais<br>(Pb + Cd + Ni + Cr) | Fase 1 – Mistura<br>Fase 1 – Composto<br>Fase 2 – Mistura<br>Fase 3 – Mistura<br>Fase 3 – Composto<br>Fase 4 – Composto | –  | –                             | –                              |

\* Fase 1, tanto para mistura como para composto, não foram analisados dados de DBO.

“–”: indica que não houve leituras nesta faixa de variabilidade para a fase em questão.

Para DQO, no composto nas Fases 1 e 3, e para mistura na Fase 2; e para DBO na mistura nas Fases 2 e 3, houve média variabilidade da eficiência de remoção de cargas com a variação da taxa de aplicação, mostrando haver uma relação entre estes, porém de menor intensidade que no caso acima. Para DQO na mistura Fase 1 e composto Fase 4; e para DBO no composto nas Fases 3 e 4, houve baixa variabilidade em relação à média, demonstrando que a taxa de aplicação não teve influência sobre a eficiência do processo nestes casos.

Tanto para as cargas de NTK como a soma de metais, a variabilidade foi baixa, não havendo portanto variação da eficiência para as quatro taxas utilizadas neste estudo.

## 6.7. Comparação com os limites de emissão de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul

Embora toda análise dos dados desta pesquisa tenha sido realizada em termos

de cargas de efluentes, apresenta-se também uma comparação das concentrações efluentes das leiras com os limites de emissão de efluentes líquidos estabelecidos pela Portaria nº 05/89 da SSMA para o Estado do Rio Grande do Sul. As tabelas do Anexo C apresentam os valores mínimo, médio e máximo das concentrações do efluentes, bem como a porcentagem das vezes que estes valores atendem aos limites de emissão da SSMA para cada leira ao longo das oito ou dez semanas de experimentação, dependendo da fase.

Observa-se uma nítida vantagem das leiras com composto como substrato para atender os limites de emissão de efluentes da SSMA para DQO DBO e NTK. O aumento das taxas de aplicação implicou, via de regra, em diminuição da porcentagem de atendimento aos limites de emissão. Atendimento em 100 % aos limites de DQO ocorreu somente nas leiras V3, V6, V14, V22, V23 e V24, todos tendo composto como substrato. Já para DBO, somente não atenderam em 100 % das amostras analisadas as leiras V10, V3, V2, V5, V8, V11 e V19, sendo apenas V3 de composto e as demais com mistura.

Os limites de emissão de carga orgânica – da SSMA – para fins de comparação, foram tomados para fontes poluidoras a serem implantadas (valor mais restritivo), e para vazão inferior a 200 m<sup>3</sup>/d, vazão correspondente a um aterro sanitário de médio a grande porte.

Embora a excelente biotransformação e redução de carga de NTK efluente (na ordem 99 %), as concentrações efluentes não atendem em 100 % os limites de emissão em todas as leiras, que é de 10 mg/L. Aqui também se verifica a vantagem das leiras com composto sobre as com mistura. A diferença das leiras de maior altura e com insuflamento de ar, porém não fica evidenciada. Nas leiras de vasos plásticos, baixa altura, obteve-se maior atendimento aos padrões de emissão nas leiras com a presença de minhocas do que naquelas onde já estava o vermicomposto, sugerindo que as minhocas exercem papel importante na remoção de NTK, pela aeração que possibilitam. Nas leiras de maior altura, esta diferença não está tão explícita, talvez porque a aeração forçada tenha suprido o papel das minhocas na Fase 4.

Quanto a emissão de nitrato, nenhuma das 24 leiras, em nenhuma das fases, atendeu ao limite de emissão de 10 mg/L. Para a remoção das altas concentrações de nitrato no percolado efluente, poder-se-ia utilizar a recirculação para campos de infiltração, onde plantas específicas iriam absorver estes nutrientes solúveis.

Os metais Pb, Ni, Cd e Cr foram analisados na soma de suas cargas para fins de análise de remoção de cargas neste estudo. Para fins de comparação com os limites de emissão, foram consideradas suas concentrações individualmente. Os limites máximos para Pb, Ni, Cd e Cr são respectivamente 0,5, 1,0, 0,1 e 0,5 mg/L. Todas as leiras atenderam em 100 % das amostras aos limites destes metais. Além da redução e atenuação destes metais nos substratos sólidos, o próprio lixiviado bruto afluente já apresentava baixas concentrações de metais, visto ser oriundo de células antigas de aterro sanitário.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1. Conclusões

Em função dos objetivos iniciais propostos, os resultados obtidos durante os dez meses de realização do experimento, em quatro fases distintas, permitem concluir o seguinte:

1. É viável tecnicamente a utilização da vermicompostagem, e do húmus já vermicompostado, para o tratamento de lixiviado de células de aterro antigas. Possivelmente esta técnica poderia ser utilizada para tratamento de lixiviado de aterros novos, desde que este lixiviado sofra um pré-tratamento, utilizando este processo como tratamento complementar;

2. Os substratos orgânicos utilizados, composto de resíduos urbanos e mistura deste com estrume bovino, apresentaram faixas ideais de relação C/N, pH e micro e macronutrientes, para o desenvolvimento do processo;

3. Em todas as leiras, e em todas as fases, verificou-se a diminuição do número de minhocas do início para o final da experimentação, resultante da fuga e morte das mesmas logo após a inoculação, demonstrando terem as mesmas dificuldades de aclimação nos primeiros momentos, fato este também corroborado pela perda de peso dos vermes;

4. Mesmo após 60 dias de vermicompostagem, os substratos não atingiram a relação C/N esperada para o processo convencional de vermicompostagem, que é 5. A possível causa da não completa humificação, provavelmente deveu-se ao aporte do lixiviado, elevando significativamente as cargas aplicadas, relativamente às taxas de vermes utilizadas para degradação;

6. As leiras com mistura de composto mais estrume bovino como substrato tiveram perdas menores de minhocas, evidenciando a superioridade nutritiva do estrume em relação ao composto;

7. O lixiviado utilizado como líquido de rega pareceu não apresentar toxicidade às minhocas, pois estas tiveram desempenho semelhante nas leiras que receberam lixiviado e nas que receberam água deionizada. Possivelmente, utilizando-se lixiviado de aterros jovens, o comportamento dos vermes seja diferente;

8. Todas as taxas de rega utilizadas implicaram em perda de peso das minhocas, em valores que variaram entre 23,3 e 67,5 %. Credita-se esta perda de peso aos ciclos de saturação aos quais as leiras eram diariamente submetidas, devido a sistemática de rega concentrada em um único momento do dia;

9. A utilização de leiras profundas, de 60 cm, com insuflamento mecânico de ar pela base, parece ser uma alternativa viável e que deva ser encorajada, visto que os vermes destas leiras tiveram perda de peso 10 % menor que nos vasos de 20 cm de profundidade;

10. A redução de carga de DQO ficou sempre acima de 50 %, sendo que o composto teve melhor eficiência em relação à mistura, e as leiras com insuflamento de ar tiveram desempenho bem superior em relação às leiras baixas;

11. A redução de carga de NTK foi superior a 98 % nas Fases 1, 3 e 4, onde havia grande oxigenação, ou pela ação das minhocas, ou pelo insuflamento mecânico, evidenciando ser o processo de grande viabilidade para realizar a nitrificação;

12. Embora a concentração de metais no lixiviado utilizado tenha sido pequena, obteve-se excelente redução na carga. Nas leiras baixas, a eficiência foi superior a 55 %, e nos vasos cerâmicos superior a 90 %, pois os íons metálicos ao atravessarem uma coluna maior, tem mais contato com o húmus e seu efeito adsortivo e quelante;

13. Por se ter utilizado lixiviado de células antigas, os ácidos voláteis estavam virtualmente ausentes;

14. Para os parâmetros cujas eficiências de redução de cargas efluentes foram analisadas, somente DQO e DBO apresentaram influência do aumento da taxa de aplicação de lixiviado. As eficiências de redução de NTK e metais pesados não foram afetadas pela variação das taxas, dentro da faixa de variação estudada;

15. Como todas as taxas de aplicação de lixiviado utilizadas – 13, 20, 30 e 40 L/m<sup>3</sup>.d de taxa volumétrica em todas as fases, e 2,1, 3,3, 4,8 e 6,4 L/m<sup>2</sup>.d de taxa superficial para as Fases 1 e 2 e 8,5, 13,0, 18,7 e 24,9 L/m<sup>2</sup>.d para as Fases 3 e 4 – implicaram em perda de peso das minhocas, e não foi verificada variação na concentração do percolado efluente em



função da variação das taxas, não se estabeleceu uma taxa ótima. Apenas a eficiência da redução de carga orgânica sofreu influência da taxa de aplicação, possivelmente pela lixiviação da grande massa orgânica presente no substrato, e não por questões relacionadas à redução da carga do lixiviado em si. Emerge, no entanto, frente aos resultados obtidos, que taxas inferiores a  $6,0 \text{ L/m}^2 \cdot \text{d}$ , quando utilizadas leiras com 20 ou 30 cm, e inferiores a  $40 \text{ L/m}^3 \cdot \text{d}$  quando utilizadas leiras de maior profundidade e com insuflamento de ar, levam a obtenção de valores tão satisfatórios quanto os obtidos nesta pesquisa;

16. Apesar das excelentes eficiências de remoção de cargas de poluentes, o processo não prescinde de um tratamento complementar para atender os padrões de emissão do Estado do Rio Grande do Sul, principalmente no que tange ao nitrato.

## 7.2. Recomendações

O estudo realizado mostrou a viabilidade da vermicompostagem para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário. Para o avanço da pesquisa neste tema, sugere-se as seguintes investigações:

1. A utilização de leiras de húmus previamente vermicompostado, sem a presença de minhocas, diminuindo o arraste de materiais devido a ação da minhocas;
2. A aplicação do lixiviado por um período superior aos dois meses deste estudo, e em completa exposição à intempérie, verificando se ocorre alteração de eficiência a longo prazo, e em escala real;
3. A vermicompostagem com taxas maiores de minhocas; e com taxas de rega menores que as utilizadas neste estudo;
4. Uma metodologia diferente de aplicação do lixiviado, fazendo a rega ao longo do dia, evitando assim os ciclos de saturação do substrato;
5. O tratamento de lixiviado novo, com altas cargas orgânicas, de nitrogênio e de metais;
6. A utilização de leiras ainda mais profundas;
7. Metodologia para determinação de balanço de massa, entre lixiviado, substrato e vermes.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKESSON, M.; NILSSON, P. 1997. Seasonal changes of leachate production and quality from test cells. *Journal of Environmental Engineering*, New York, V.123, n.9, p.892–900.
- APPELHOF, M. 1981. Current progress in earthworm research. In: COMPOST SCIENCE: Land Utilization. p.36–38.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1985. *Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos*: NBR-8419. Rio de Janeiro. 9p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1987. *Resíduos sólidos – classificação*: NBR-10004. Rio de Janeiro. 63 p.
- BARLAZ, M.A.; HAM, R.K.; SCHAEFFER, D.M. 1990. Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. *Critical Reviews in Environmental Control*, Boca Raton, V.19, n.6, p.557–584.
- BIDONE, F.R.A. 1995. *A vermicompostagem dos resíduos sólidos de curtume, brutos e previamente lixiviados, utilizando composto orgânico urbano como substrato*. São Carlos: Escola de Engenharia da USP. 300 p. Tese (Doutorado).
- BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. 1996. Mobilidade do metal pesado cromo durante a vermicompostagem de resíduos sólidos de curtume, codispostos com composto de lixo orgânico urbano. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. PROJETOS DE ATERROS DE RESÍDUOS E SANEAMENTO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1996, Porto Alegre. *Artigos técnicos*. Porto Alegre: ABES. p.27-31.
- BOYLE, W.C.; HAM, R.K. 1974. Biological treatability of landfill leachate. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.46, n.5, p.860–872.
- BRADY, N.C. 1983. *Natureza e propriedade dos solos*. [s.l.: s.n.]
- BREEN, B. 1990. Landfill are # 1. *Garbage: the practical journal for the environment*, V.2, n.5, p.42–47.
- BREEN, B. 1991. Visionaries: the future of garbage. *Garbage: the practical journal for the environment*, V.3, n.5, p.26–33.

- BRIGES, J.S.; CURRAN, M.A. 1994. Life cycle assessment for municipal solid waste management. In: INTERNATIONAL DIRECTORY OF SOLID WASTE MANAGEMENT 1993/94. p.15–19.
- CAMERON, R.D.; KOCH, F.A. 1980. Toxicity of landfill leachates. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.52, n.4, p.760–769.
- CAMPOS, H.K.T.; ABREU, M.F. 1995. Integrated waste management system of Belo Horizonte City. In: LATIN AMERICAN – SWEDISH SEMINAR ON SOLID WASTE MANAGEMENT, Rio de Janeiro, p.35–44.
- CARMONY, F. 1979. Earthworm composting – A growing technology. In: COMPOST SCIENCE: Land Utilization, p.30–31.
- CHERNICHARO, C.A.L. 1997. Reatores anaeróbios. In: PRINCÍPIOS do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: UFMG. V.5.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 1985. *Dicionário de termos técnicos de saneamento ambiental*. São Paulo. 8p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. 1987. *Utilização de minhocas na produção de composto orgânico*. São Paulo. 8p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. s.d. *Lixo: um problema sem solução? Só depende de você*. Novo Horizonte. 17p.
- COOK, E.N.; FOREE, E.G. 1974. Aerobic bioestabilization of sanitary landfill leachate. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.46, n.2, p.380–392.
- COTRIM, S.L.S. 1997. *Filtros aeróbios percoladores aplicados ao tratamento de lixiviados de aterros sanitários antigos*. Porto Alegre: UFRGS – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 120p. Dissertação (Mestrado).
- COUTINHO, J.L.. 1996. *Estudo da vermicompostagem de lodo sedimentado proveniente do processo de tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos*. São Carlos: Escola de Engenharia da USP. 150p. Dissertação (Mestrado).
- DANIEL, D.E. 1995. Soil barrier layers versus geosynthetic barriers in landfill cover systems. In: DUNN, R., Jefferson, SINGH, Udai P., ed. *Landfill Closures*. New York: ASCE. p.1–18. (Geotechnical Special Publication, n.53).
- DANTAS, D.C. 1982. *A problemática do tratamento de lixívias de aterros sanitários*. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 149p. Dissertação (Mestrado).
- DUTRA, A.L.; BALLESTRIN, R.A.C. 1997. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos modelo Porto Alegre. *Ecos*, Porto Alegre, V.4, n.10, p.34.
- EPA. 1989. *Federal Register: pollution prevention policy statement*. V.54.

- ESCOSTEGUY, P.A.V. *et al.* 1991. Bioremediação do Lixão da Zona Norte de Porto Alegre. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 16., 1991, Goiânia. *Anais*. Rio de Janeiro: ABES.
- FLEENOR, W.E.; KING, I.P. 1995. Identifying limitations on use of the HELP model. In: DUNN, R., Jefferson, SINGH, Uday P., ed. *Landfill Closures*. New York: ASCE. p.121–138. (Geotechnical Special Publication, n.53).
- FUZARO, J. 1994. *Resíduos sólidos domésticos: tratamento e disposição final*. São Paulo: CETESB.
- GANDOLLA, M.; ACAIA, C.; FICHER, C. 1995. Técnicas, exploração e gestão dos aterros sanitários. In: *TRATAMENTO biológico de resíduos sólidos urbanos: curso*. Belo Horizonte, 90 p.
- GARCIA JUNIOR, A.D.; GRANDIN, S.R.; ALEM SOBRINHO, P. 1995. Avaliação da adição de produtos biotecnológicos em sistemas de lagoas aeradas tratando percolado de aterro sanitário, em escala de laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 18., 1995, Salvador. *Anais*. Salvador: ABES. 15p.
- GEHLING, G.R. 1985. *Disposição de esgotos domésticos por infiltração em solos arenosos*. Porto Alegre: UFRGS – Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 137p. Dissertação (Mestrado).
- GOMES, L.P.. 1989. *Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários*. São Carlos: Escola de Engenharia da USP. 161p. Dissertação (Mestrado).
- GOMES, L.P.. 1995. *Avaliação da atividade bacteriana anaeróbia celulolítica do chorume originado em sistema de disposição de resíduos sólidos urbanos a céu aberto*. São Carlos: Escola de Engenharia da USP. 210p. Tese (Doutorado).
- HAND, P.; HAYES, W.A. 1983. The composting of slurries by earthworms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSTING OF SOLID WASTE AND SLURRIES. *Proceedings*. Leeds: University of Leeds. p.246–260.
- HARRIS, G. 1990. Vermicomposting in a rural community. In: BIOCYCLE, p.48–51.
- HENRY, J.G. 1985. New developments in landfill leachate treatment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW DIRECTIONS AND RESEARCH IN WASTE TREATMENT AND RESIDUALS MANAGEMENT. *Proceedings*. University of British Columbia. p.1–139.
- HMSO. 1995. *Landfill design, construction and operation practice*. London: Department of the Environment. 289p. (Waste Management Paper 26B).
- HOGLAND, W. 1995. Landfill methods. In: LATIN AMERICAN – SWEDISH SEMINAR ON SOLID WASTE MANAGEMENT, Rio de Janeiro. p.45–56.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 1991. *PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, 1989. Rio de Janeiro.
- KEENAN, J.D.; STEINER, R.L.; FUNGAROLI, A.A. 1984. Landfill leachate treatment. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.56, n.1, p.27–33.
- KELLY, H.G. 1987. Pilot testing for combined treatment of leachate from a domestic waste landfill site. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.59, n.5, p.254–261.
- KIEHL, E.J. 1985. *Fertilizantes orgânicos*. São Paulo: Ceres. 492p.
- KNÄPPER, C. 1984. A criação de minhocas em viveiros. *Estudos Leopoldenses*, São Leopoldo, V.78, p.37–40.
- KNÄPPER, C. 1990. Vermicompostagem: uma nova proposta de discussão. *Estudos Leopoldenses*, São Leopoldo, V.26, n.115, p.33–50.
- KNÄPPER, C. 1992. Cascas de nozes são transformadas em adubo. *Informativo Unisinos*, São Leopoldo, V. 6, p.1–21.
- KNOCH, J; STEGMANN, R. 1993. *Tratamiento de lixiviados*. San José: Coordinación Sectorial Regional para Latinoamérica en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la GTZ. 22p.
- LANDRETH, R.E. 1995. Why dry landfills without leachate recirculation are effective. In: DUNN, R., Jefferson, SINGH, Udai P., ed. *Landfill Closures*. New York: ASCE. p.100–105. (Geotechnical Special Publication, n.53).
- LEMA, J.M.; MENDEZ, R.; BLAZQUEZ, R. 1988. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water, Air and Soil Pollution*, V.40, p.223–250.
- LIMA, L.M.Q. 1986. *Resíduos sólidos urbanos: compêndio de publicações*. Campinas: CPFL.
- LIMA, L.M.Q. 1995. *Lixo: tratamento e biorremediação*. 3.ed. ver. ampl. São Paulo: Hemus. 265p.
- LONGO, A.D. 1992. *Minhoca: de fertilizadora do solo a fonte alimentar*. São Paulo: Ícone, 79p.
- MATSUFUJI, Y. 1995. *Technical guideline on sanitary landfill*. Fukuoka: Japan International Cooperation Agency. 311p.
- METCALF & EDDY, Inc. 1991. *Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*. 3<sup>a</sup> ed. Singapura: McGraw-Hill, 1334p.
- MONTEGGIA, L.O. 1996. *Operações e processos unitários de tratamento: notas de aula*. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

- MORAES, V.A.; GOMES, J.A. 1993. Tratamento de líquidos percolados de aterros sanitários em reator anaeróbio híbrido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 1993, Natal. *Anais*. Rio de Janeiro: ABES. V.2, t.3, p.342–354.
- MOSEY, F.E.; HUGHES, D.A. 1975. The toxicity of heavy metal ions to anaerobic digestion. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.47, p.18–39.
- NICK, E.; KELLNER, S.R.O. 1971. *Fundamentos de estatística para as ciências do comportamento*. 3.ed. Rio de Janeiro: Renes. 312p.
- NOVAES, R.F.V. 1986. Microbiology of anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, Oxford, V.18, p.1–14.
- PAYTON, R.L.; SCHROEDER, P.R. 1993. Water balance for landfills. In: DANIEL, David E., ed. *Geotechnical Practice for Waste Disposal*. London: Chapman and Hall. ch.10, p.214–243.
- PELCZAR, M.J.; REID, R.; CHAN, E.C.S. 1980. *Microbiologia*. São Paulo: McGraw-Hill. V.1.
- PESSIN, N.; MANDELLI, S.M.C.; SLOMPO, M. 1991. Determinação da composição física e das características físico-químicas dos resíduos sólidos domésticos da cidade de Caxias do Sul. In: MANDELLI, S.M.C; LIMA, L.M.Q.; OJIMA, M., ed. *Tratamento de resíduos sólidos: compêndio de publicações*. Caxias do Sul: Ed. do Autor. p.67–99.
- PIMENTEL GOMES, F. 1984. *A estatística moderna na pesquisa agropecuária*. Piracicaba: POTAFOS. 157p.
- POHLAND, F.G.; DERIEN, J.T.; GHOSH, S.B. 1983. Leachate and gas quality changes during landfill stabilization of municipal refuse. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION 3., 1983. *Proceedings*. Boston. p.185–210.
- POHLAND, F.G.; GOULD, J.P. 1986. Codisposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE TRATAMENTO ANAERÓBIO EM PAÍSES TROPICAIS, 1986, São Paulo. *Anais*. São Paulo: CETESB.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento Municipal de Limpeza Urbana. 1993. *Monitoramento do aterro sanitário Três Meninas*. Porto Alegre. Não publicado.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento Municipal de Limpeza Urbana. 1995. *Composição*. Porto Alegre.
- PORTO ALEGRE. Prefeitura Municipal. Departamento Municipal de Limpeza Urbana. 1998. *Relatório de monitoramento ambiental do aterro sanitário da Extrema*. Porto Alegre. Não publicado.
- QASIM, S.R.; CHIANG, W. 1994. *Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment*. Lancaster: Technomic, 339p.

- REES, J.F. 1980. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic mater. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, London, V.30, p.161–175.
- REICHERT, G.A.; DOS ANJOS, I. 1997. Aterro sanitário da Extrema de Porto Alegre: concepção de projeto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIO E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. *Trabalhos técnicos*. Rio de Janeiro: ABES. p.1852–1862.
- REICHERT, G.A. et al. 1993. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos em Porto Alegre. In: SIMPÓSIO LATINO–AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 1., São Paulo. *Anais*. São Paulo: AIDIS. p.324–340.
- RIBEIRO, S. 1992. Considerações preliminares sobre a reciclagem de resíduos de frigoríficos através da vermicompostagem. São Leopoldo: UNISINOS, Centro de Ciências da Saúde, Curso Biologia. 37f. Trabalho de conclusão.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual da Saúde e do Meio Ambiente. 1989. *Portaria n. 05/89 SSMA*: Critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados por todas as fontes poluidoras que lançam seus efluentes nos corpos d’água interiores no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- ROBINSON, H.D.; MARIS, P.J. 1985. The treatment of leachates from domestic waste in landfill sites. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.57, n.1, p.30–38.
- ROCCA, A.C.C. et al. 1979. *Drenagem em aterros sanitários*. São Paulo: CETESB. 66p.
- RÜGER, K.F.; GODOI, M.O.; MACHADO, P.G.; CAVALCANTI, J.E.W. 1996. Avaliação de alternativas para o tratamento de chorume do Aterro Sanitário Bandeirantes – São Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL. PROJETOS DE ATERROS DE RESÍDUOS E SANEAMENTO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1996, Porto Alegre. *Artigo técnicos*. Porto Alegre: ABES. p.209–213.
- SALVADOR. Empresa de Limpeza Urbana. 1994. *Sistema de tratamento de lixo*. Projeto de bioremediação de Canabrava: resultados preliminares. Salvador.
- SCHAFFER, P.E.; CARTER, J.L.; WOELFEL, G.C. 1986. Firsts year’s operating performance of the Omega Hill Landfill pretreatment anaerobic filter. In: INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE, 41., 1986, Purdue University. *Proceedings*. Chelsea: Lewis. p.383–389.
- SHARMA, H.D.; LEWIS, S.P. 1994. *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: design and evaluation*. New York: John Wiley. 588p.
- SOUZA, M.E. 1982. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FERMENTAÇÃO, 5., 1982. Viçosa. p.1–7.
- SPENGLER, D.B.; DZOMBAK, D.A. 1991. Treatment of landfill leachate with rotating biological contactors: bench scale experiments. *Journal. Water Pollution Control Federation*, Washington, V.63, n.7, p.971–981.

- STANDARD methods for the examination of water and wastewater. 1992. 18.ed. Washington: American Public Health Association. Não paginado
- TASK, J. 1992. *Design of municipal wastewater treatment plant*. V.2, 2ed., Alexandria: Water Environmental Federation. 1592p.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIRGIL, S. 1993. *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill. 978p.
- VAN HAANDEL, A.C.; LETTINGA, G. 1994. *Tratamento anaeróbio de esgotos: um manual para regiões de clima quente*. Campina Grande: EPGRAF. 239p.
- VERAS, L.R.V. 1996. *A vermicompostagem de lodo de lagoas consorciado com composto de lixo orgânico urbano*. São Carlos: Escola de Engenharia da USP. 124p. Dissertação (Mestrado).
- VON SPERLING, M. 1995. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: UFMG/DESA. 240p.
- VON SPERLING, M. 1996. *Lagoas de estabilização*. Belo Horizonte: UFMG. 134p.
- WU, Y.C.; HAO, O.J.; OU, K.C.; SCHOLZE, R.J. 1988. Treatment of leachate from a solid waste landfill site using a two-stage anaerobic filter. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, V.31, p.257–266.
- YANG, S.T; OKOS, M.R. 1987. Kinetic study and mathematical modeling of methanogenesis of acetate using pure cultures of methanogens. *Biotechnology and Bioengineering*, New York, V.30, p.661–667.
- YOSHIDA, H. 1995. Domestic waste management administration. In: —. *Urban solid waste management*. Osaka: JICA.



## **9. ANEXOS**

**Anexo A**

**Anexo B**

**Anexo C**

**Anexo D**

**A n e x o A**

**Tabelas com os resultados analíticos das quatro fases da pesquisa**

**Tabela A.1 - Caracterização dos substratos básicos utilizados na pesquisa**

| Parâmetro                            | Substratos básicos |          |
|--------------------------------------|--------------------|----------|
|                                      | Estrume bovino     | Composto |
| pH                                   | 5,8                | 7,2      |
| C org.(%)                            | 18                 | 8,2      |
| NTK (%)                              | 1,4                | 0,70     |
| P (%)                                | 0,35               | 0,20     |
| K (%)                                | 0,47               | 0,24     |
| Ca (%)                               | 0,42               | 3,7      |
| Mg (%)                               | 0,14               | 0,10     |
| Cu (mg/kg)                           | 144                | 141      |
| Zn (mg/kg)                           | 158                | 588      |
| Fe (%)                               | 6,9                | 5,3      |
| Mn (mg/kg)                           | 1.347              | 610      |
| Na (mg/kg)                           | 373                | 533      |
| S (%)                                | 0,24               | 0,14     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 197                | 33       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 903                | 267      |
| Pb (mg/kg)                           | 36                 | 100      |
| Cd (mg/kg)                           | 1                  | 1        |
| Ni (mg/kg)                           | 47                 | 35       |
| Cr (mg/kg)                           | 44                 | 103      |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.2 - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da Fase 1, ao início do experimento**

| Parâmetro                            | Leira |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                      | V1    | V2   | V3   | V4   | V5   | V6   | V7   | V8   | V9   | V10  | V11  | V12  |
| pH                                   | 6,6   | 6,5  | 7,2  | 6,5  | 6,5  | 7,2  | 6,4  | 6,5  | 7,2  | 6,6  | 6,9  | 7,2  |
| C org.(%)                            | 12    | 13   | 8,2  | 12   | 13   | 8,2  | 12   | 13   | 8,2  | 13   | 10   | 8,2  |
| NTK (%)                              | 1,0   | 0,96 | 0,70 | 0,94 | 1,1  | 0,70 | 1,0  | 1,2  | 0,70 | 0,98 | 0,95 | 0,70 |
| P (%)                                | 0,25  | 0,24 | 0,20 | 0,24 | 0,26 | 0,20 | 0,27 | 0,26 | 0,20 | 0,25 | 0,24 | 0,20 |
| K (%)                                | 0,28  | 0,28 | 0,24 | 0,28 | 0,28 | 0,24 | 0,29 | 0,30 | 0,24 | 0,31 | 0,28 | 0,24 |
| Ca (%)                               | 1,4   | 1,3  | 3,7  | 1,3  | 0,87 | 3,7  | 1,3  | 0,81 | 3,7  | 0,83 | 1,4  | 3,7  |
| Mg (%)                               | 0,16  | 0,14 | 0,10 | 0,10 | 0,14 | 0,10 | 0,13 | 0,12 | 0,10 | 0,13 | 0,12 | 0,10 |
| Cu (mg/kg)                           | 145   | 137  | 141  | 128  | 128  | 141  | 131  | 121  | 141  | 128  | 129  | 141  |
| Zn (mg/kg)                           | 324   | 328  | 588  | 292  | 328  | 588  | 353  | 185  | 588  | 335  | 425  | 588  |
| Fe (%)                               | 5,8   | 5,4  | 5,3  | 5,7  | 5,2  | 5,3  | 5,1  | 5,4  | 5,3  | 5,5  | 5,2  | 5,3  |
| Mn (mg/kg)                           | 895   | 852  | 610  | 895  | 883  | 610  | 820  | 840  | 610  | 852  | 713  | 610  |
| Na (mg/kg)                           | 373   | 373  | 533  | 373  | 373  | 533  | 347  | 400  | 533  | 400  | 427  | 533  |
| S (%)                                | 0,20  | 0,18 | 0,14 | 0,18 | 0,18 | 0,14 | 0,12 | 0,19 | 0,14 | 0,20 | 0,18 | 0,14 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 113   | 118  | 33   | 139  | 138  | 33   | 123  | 141  | 33   | 143  | 103  | 33   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 746   | 738  | 267  | 725  | 726  | 267  | 707  | 629  | 267  | 692  | 478  | 267  |
| Pb (mg/kg)                           | 77    | 91   | 100  | 73   | 86   | 100  | 109  | 73   | 100  | 68   | 136  | 100  |
| Cd (mg/kg)                           | 1     | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
| Ni (mg/kg)                           | 41    | 38   | 35   | 41   | 35   | 35   | 47   | 35   | 35   | 44   | 35   | 35   |
| Cr (mg/kg)                           | 80    | 82   | 103  | 75   | 160  | 103  | 78   | 75   | 103  | 71   | 126  | 103  |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.3** – Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 1**, aos 30 dias do experimento

| Parâmetro                            | Leira    |      |      |          |      |          |          |      |          |          |      |          |
|--------------------------------------|----------|------|------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|
|                                      | V1       | V2   | V3   | V4       | V5   | V6       | V7       | V8   | V9       | V10      | V11  | V12      |
| pH                                   | 6,3      | 6,5  | 6,5  | 6,3      | 6,6  | 6,6      | 6,4      | 6,7  | 6,6      | 6,5      | 6,8  | 6,6      |
| C org.(%)                            | 10       | 10   | 7,5  | 10       | 9,8  | 8,4      | 9,7      | 9,3  | 8,4      | 9,9      | 9,6  | 7,2      |
| NTK (%)                              | 0,93     | 0,78 | 0,80 | 0,86     | 0,80 | 0,68     | 0,85     | 0,82 | 0,76     | 0,80     | 0,86 | 0,67     |
| P (%)                                | 0,28     | 0,23 | 0,24 | 0,25     | 0,26 | 0,24     | 0,24     | 0,26 | 0,20     | 0,26     | 0,26 | 0,21     |
| K (%)                                | 0,21     | 0,14 | 0,20 | 0,21     | 0,13 | 0,18     | 0,21     | 0,13 | 0,16     | 0,20     | 0,13 | 0,18     |
| Ca (%)                               | 2,1      | 2,0  | 2,2  | 1,4      | 0,88 | 1,4      | 0,78     | 0,96 | 2,0      | 0,78     | 1,4  | 2,7      |
| Mg (%)                               | 0,10     | 0,10 | 0,10 | 0,18     | 0,18 | 0,16     | 0,14     | 0,13 | 0,14     | 0,17     | 0,14 | 0,16     |
| Cu (mg/kg)                           | 94       | 87   | 138  | 90       | 92   | 96       | 82       | 108  | 96       | 92       | 88   | 99       |
| Zn (mg/kg)                           | 240      | 248  | 884  | 278      | 320  | 410      | 292      | 298  | 479      | 234      | 214  | 461      |
| Fe (%)                               | 4,5      | 4,8  | 4,2  | 4,4      | 4,2  | 5,2      | 4,1      | 5,6  | 4,9      | 4,3      | 5,7  | 4,7      |
| Mn (mg/kg)                           | 734      | 714  | 493  | 698      | 723  | 486      | 685      | 692  | 486      | 712      | 643  | 466      |
| Na (mg/kg)                           | 0,10 (%) | 250  | 904  | 0,10 (%) | 284  | 0,11 (%) | 0,11 (%) | 314  | 0,10 (%) | 0,11 (%) | 242  | 0,10 (%) |
| S (%)                                | 0,09     | 0,06 | 0,08 | 0,08     | 0,06 | 0,08     | 0,10     | 0,04 | 0,08     | 0,08     | 0,04 | 0,04     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 318      | 294  | 146  | 310      | 348  | 128      | 285      | 300  | 136      | 321      | 258  | 114      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 1488     | 570  | 1047 | 1575     | 636  | 1045     | 1169     | 400  | 972      | 1422     | 386  | 1110     |
| Pb (mg/kg)                           | 58       | 55   | 85   | 59       | 52   | 84       | 48       | 62   | 90       | 54       | 52   | 78       |
| Cd (mg/kg)                           | 1        | 2    | 2    | 1        | 2    | 2        | 1        | 1    | 2        | 2        | 2    | 2        |
| Ni (mg/kg)                           | 32       | 28   | 26   | 30       | 29   | 26       | 30       | 30   | 24       | 30       | 30   | 26       |
| Cr (mg/kg)                           | 45       | 47   | 74   | 50       | 46   | 74       | 51       | 42   | 76       | 44       | 40   | 90       |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.4** - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 1**, aos 60 dias do experimento

| Parâmetro                            | Leira |      |      |          |          |      |          |          |      |          |          |      |
|--------------------------------------|-------|------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|----------|----------|------|
|                                      | V1    | V2   | V3   | V4       | V5       | V6   | V7       | V8       | V9   | V10      | V11      | V12  |
| pH                                   | 5,8   | 6,2  | 6,8  | 5,8      | 6,3      | 6,9  | 5,7      | 6,3      | 6,9  | 5,7      | 6,4      | 6,7  |
| C org.(%)                            | 15    | 14   | 11   | 14       | 15       | 10   | 15       | 13       | 9    | 13       | 15       | 10   |
| NTK (%)                              | 0,92  | 1,1  | 0,72 | 1,0      | 0,93     | 0,90 | 1,0      | 0,72     | 0,70 | 0,60     | 0,54     | 0,67 |
| P (%)                                | 0,30  | 0,32 | 0,25 | 0,30     | 0,32     | 0,20 | 0,30     | 0,32     | 0,24 | 0,33     | 0,32     | 0,25 |
| K (%)                                | 0,38  | 0,26 | 0,35 | 0,40     | 0,24     | 0,35 | 0,38     | 0,18     | 0,30 | 0,36     | 0,20     | 0,35 |
| Ca (%)                               | 0,96  | 0,80 | 1,8  | 1,5      | 1,2      | 1,2  | 1,0      | 1,9      | 1,5  | 1,1      | 1,1      | 1,6  |
| Mg (%)                               | 0,28  | 0,24 | 0,26 | 0,26     | 0,24     | 0,23 | 0,29     | 0,24     | 0,27 | 0,31     | 0,27     | 0,30 |
| Cu (mg/kg)                           | 118   | 114  | 104  | 112      | 120      | 113  | 128      | 126      | 116  | 118      | 116      | 116  |
| Zn (mg/kg)                           | 344   | 416  | 462  | 346      | 358      | 464  | 440      | 377      | 561  | 352      | 332      | 443  |
| Fe (%)                               | 7,0   | 5,8  | 5,5  | 6,8      | 6,9      | 4,6  | 7,0      | 7,3      | 5,5  | 7,1      | 6,2      | 5,5  |
| Mn (mg/kg)                           | 998   | 892  | 633  | 0,11 (%) | 0,10 (%) | 636  | 0,11 (%) | 0,12 (%) | 853  | 0,10 (%) | 0,10 (%) | 640  |
| Na (mg/kg)                           | -     | -    | -    | -        | -        | -    | -        | -        | -    | -        | -        | -    |
| S (%)                                | 0,16  | 0,18 | 0,12 | 0,17     | 0,18     | 0,12 | 0,15     | 0,16     | 0,16 | 0,17     | 0,19     | 0,16 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 144   | 147  | 58   | 124      | 138      | 76   | 145      | 138      | 68   | 134      | 171      | 94   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 2112  | 714  | 1721 | 2060     | 596      | 1674 | 1754     | 360      | 1204 | 2004     | 277      | 2091 |
| Pb (mg/kg)                           | 68    | 57   | 96   | 68       | 67       | 91   | 67       | 67       | 128  | 49       | 68       | 105  |
| Cd (mg/kg)                           | <1    | <1   | <1   | <1       | <1       | <1   | <1       | <1       | <1   | <1       | <1       | <1   |
| Ni (mg/kg)                           | 36    | 31   | 27   | 32       | 34       | 26   | 34       | 37       | 46   | 32       | 31       | 25   |
| Cr (mg/kg)                           | 84    | 70   | 120  | 76       | 83       | 105  | 54       | 81       | 146  | 138      | 73       | 111  |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.5** - Caracterização do líquido percolado de cada leira, **Fase 1**, na semana que antecedeu o início de aplicação do chorume (umidecimento prévio com água deionizada) (mg/l, exceto pH)

| Parâmetro                     | Semana zero |      |       |      |      |       |      |      |       |      |      |       |
|-------------------------------|-------------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
|                               | V1          | V2   | V3    | V4   | V5   | V6    | V7   | V8   | V9    | V10  | V11  | V12   |
| pH                            | 7,2         | 6,7  | 7,2   | 7,1  | 7,5  | 7,4   | 7,1  | 7,2  | 7,5   | 7,4  | 7,6  | 7,3   |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 4,3         | 0,75 | 0,23  | 0,49 | 0,62 | 0,13  | 0,68 | 0,49 | 0,15  | 0,39 | 0,52 | 0,23  |
| P                             | 1,4         | 7,05 | 2,15  | 4,6  | 5,8  | 1,2   | 6,4  | 4,6  | 1,38  | 3,68 | 4,9  | 2,15  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 207         | 201  | 196   | 200  | 204  | 194   | 202  | 203  | 196   | 203  | 200  | 203   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0,03        | 0,01 | 0,005 | 0,01 | 0,02 | ND    | 0,02 | ND   | ND    | ND   | ND   | ND    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 17          | 10   | 8,0   | 3,9  | 3,9  | 2,2   | 3,4  | 2,8  | 1,4   | 3,2  | 3,1  | 1,7   |
| NTK                           | 20          | 11   | 8,4   | 4,8  | 4,5  | 2,5   | 3,7  | 3,4  | 2,0   | 3,4  | 4,2  | 2,2   |
| Pb                            | 0,15        | 0,12 | 0,08  | 0,18 | 0,18 | 0,1   | 0,16 | 0,16 | 0,07  | 0,14 | 0,14 | 0,1   |
| Cu                            | 0,06        | 0,06 | 0,03  | 0,08 | 0,08 | 0,03  | 0,08 | 0,07 | 0,06  | 0,07 | 0,08 | 0,04  |
| Cr                            | ND          | ND   | ND    | ND   | ND   | ND    | 0,02 | ND   | ND    | ND   | ND   | ND    |
| Cd                            | 0,02        | 0,01 | 0,01  | 0,02 | 0,02 | 0,01  | 0,02 | 0,02 | 0,01  | 0,02 | 0,02 | 0,01  |
| Ca                            | 660         | 395  | 215   | 670  | 615  | 200   | 620  | 525  | 190   | 550  | 550  | 350   |
| Fe                            | 0,18        | 0,22 | 0,20  | 0,25 | 0,19 | 0,66  | 0,22 | 0,33 | 2,0   | 0,16 | 0,21 | 0,26  |
| Mg                            | 413         | 368  | 161   | 440  | 429  | 219   | 450  | 362  | 164   | 371  | 371  | 115   |
| Mn                            | 0,04        | 0,03 | 0,01  | 0,05 | 0,05 | 0,1   | 0,06 | 0,08 | 0,06  | 0,03 | 0,09 | 0,03  |
| Ni                            | ND          | ND   | ND    | 0,02 | ND   | ND    | ND   | ND   | 0,02  | ND   | ND   | ND    |
| K                             | 605         | 425  | 125   | 625  | 575  | 130   | 600  | 515  | 520   | 570  | 555  | 315   |
| Na                            | 160         | 105  | 60    | 160  | 150  | 55    | 140  | 120  | 120   | 130  | 135  | 75    |
| Zn                            | 0,10        | 0,12 | 0,03  | 0,12 | 0,12 | 0,05  | 0,18 | 0,14 | 0,07  | 0,14 | 0,10 | 0,06  |
| Volume coletado (ml)          | 650         | 800  | 1.300 | 500  | 610  | 1.350 | 560  | 730  | 1.360 | 450  | 590  | 1.500 |

Obs.: Foram aplicados diariamente em cada leira, 300 ml de água deionizada, no período compreendido entre 03/01/97 e 22/01/97. Os volumes percolados foram coletados e conservados, obtendo-se amostras compostas para o período, para cada leira estudada. Os resultados das análises dessas amostras são os constantes da tabela.

ND: Não detectado

**Tabela A.6** - Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da **Fase 1** (mg/l, exceto pH)

| Parâmetro                     | Data da caracterização |          |          |
|-------------------------------|------------------------|----------|----------|
|                               | 27/01/97               | 27/02/97 | 20/03/97 |
| pH                            | 7,4                    | 7,6      | 7,7      |
| DQO                           | 900                    | 930      | 900      |
| DBO <sub>5</sub>              | 790                    | 100      | 80       |
| NTK                           | 644                    | 660      | 30       |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 619                    | -        | -        |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 0,02                   | ND       | ND       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 16                     | 5,12     | 517      |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 5,20                   | 0,28     | 0,093    |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | -                      | 3,26     | 16,870   |
| K                             | -                      | 10,916   | 10,870   |
| Ca                            | -                      | 39,342   | 36,447   |
| Mg                            | -                      | 17,702   | 17,729   |
| Mn                            | -                      | 0,349    | 0,706    |
| Fe                            | -                      | 8,604    | 7,16     |
| Cu                            | -                      | 0,118    | 0,099    |
| Zn                            | -                      | 0,100    | 0,070    |
| Na                            | -                      | 13,766   | 14,24    |
| Pb                            | -                      | 0,150    | 0,063    |
| Ni                            | -                      | 0,021    | 0,016    |
| Cd                            | -                      | 0,009    | 0,006    |
| Cr                            | -                      | 0,057    | 0,048    |
| Ac. acético                   | -                      | 1,58     | 0,11     |
| Ac. propiônico                | -                      | 1,72     | 0,28     |
| Ac. butírico                  | -                      | ND       | ND       |
| Ac. iso-butírico              | -                      | 1,41     | 0,10     |
| Ac. valérico                  | -                      | ND       | ND       |
| Ac. iso-valérico              | -                      | ND       | ND       |

ND: Não detectado

**Tabela A.7 – Resultado das análises do percolado das Leiras V1 e V2, Fase 1 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana (Leira V1) |       |       |       |       |       |       |       | Semana (Leira V2) |       |       |       |      |       |       |       |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
|                               | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     | 7     | 8     |
| pH                            | -                 | -     | -     | -     | 7,02  | 7,29  | 7,18  | 7,21  | -                 | -     | -     | -     | 7,06 | 7,21  | 7,15  | 7,17  |
| DQO                           | 560               | 430   | 420   | 380   | 430   | 420   | 370   | 380   | 600               | 480   | 450   | 400   | 410  | 300   | 260   | 340   |
| DBO <sub>5</sub>              | 44                | -     | 120   | 18    | 28    | 6     | 16    | 20    | 56                | -     | 120   | 18    | 9    | 14    | 10    | 21    |
| NTK                           | 0,8               | 15,0  | 4,2   | 2,2   | 1,7   | 4,5   | 2,8   | 2,5   | 1,1               | 9,0   | 2,8   | 3,4   | 4,5  | 3,4   | 2,8   | 3,2   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0,8               | 15,0  | 3,8   | -     | -     | -     | -     | -     | 1,1               | 9,0   | 2,5   | -     | -    | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND   | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1518              | 910   | 706   | 868   | 1140  | 744   | 1686  | 3773  | 1025              | 850   | 659   | 918   | 1050 | 1209  | 1278  | 1951  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 0,12              | 0,72  | 0,42  | 0,86  | ND    | 0,20  | ND    | 0,25  | 0,58              | 0,36  | 0,24  | 0,99  | 0,47 | 0,38  | 0,56  | 0,60  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 3317              | 67,5  | 61,3  | 120   | 218   | 124   | 150   | 168   | 316               | 145   | 117   | 101   | 268  | 121   | 186   | 145   |
| K                             | -                 | 8,44  | 11,0  | 7,38  | 8,16  | 10,9  | 10,7  | 7,39  | -                 | 9,92  | 7,75  | 7,49  | 5,52 | 7,41  | 6,07  | 7,28  |
| Ca                            | -                 | 23,5  | 22,6  | 23,4  | 23,5  | 27,1  | 27,1  | 23,4  | -                 | 19,3  | 22,7  | 24,0  | 18,7 | 23,7  | 23,4  | 21,2  |
| Mg                            | -                 | 13,6  | 12,1  | 14,4  | 17,7  | 14,6  | 12,8  | 17,5  | -                 | 7,35  | 11,2  | 6,68  | 16,9 | 6,00  | 8,32  | 10,8  |
| Mn                            | -                 | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,31  | 0,57  | 0,18  | -                 | 0,09  | ND    | 0,03  | ND   | ND    | ND    | ND    |
| Fe                            | -                 | 0,44  | 0,26  | 0,86  | 0,07  | 0,67  | 0,37  | 0,07  | -                 | 0,23  | 0,28  | 0,30  | 0,02 | 0,26  | 0,26  | 0,02  |
| Cu                            | -                 | 0,03  | 0,07  | 0,07  | 0,05  | 0,07  | 0,08  | 0,04  | -                 | 0,06  | 0,04  | 0,05  | 0,02 | 0,06  | 0,07  | 0,02  |
| Zn                            | -                 | 0,05  | 0,09  | 0,06  | 0,06  | 0,08  | 0,09  | 0,03  | -                 | 0,08  | 0,10  | 0,09  | ND   | ND    | 0,01  | ND    |
| Na                            | -                 | 12,80 | 3,90  | 4,69  | 4,76  | -     | 10,90 | 5,36  | -                 | 2,78  | 3,68  | 3,14  | 3,13 | -     | 2,00  | 2,80  |
| Pb                            | -                 | 0,041 | 0,041 | 0,063 | 0,019 | 0,063 | 0,069 | 0,063 | -                 | 0,041 | 0,041 | 0,063 | ND   | 0,041 | 0,063 | 0,018 |
| Ni                            | -                 | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,005 | 0,016 | ND    | -                 | 0,021 | ND    | 0,005 | ND   | ND    | ND    | ND    |
| Cd                            | -                 | 0,009 | 0,005 | 0,005 | 0,003 | 0,003 | 0,007 | ND    | -                 | ND    | ND    | 0,003 | ND   | ND    | 0,010 | ND    |
| Cr                            | -                 | 0,010 | ND    | 0,015 | 0,015 | 0,047 | 0,020 | 0,026 | -                 | 0,015 | ND    | 0,010 | ND   | 0,041 | 0,015 | 0,005 |
| Ac. acético                   | 0,91              | 1,40  | 0,81  | 1,39  | 0,92  | 1,09  | 1,19  | 0,59  | 0,76              | 0,98  | 0,59  | 1,39  | 1,80 | 1,36  | 1,97  | 0,98  |
| Ac. propiônico                | 0,62              | 0,19  | 0,45  | 0,07  | 0,29  | 0,43  | 0,37  | 0,66  | 0,29              | 0,60  | ND    | 0,07  | 0,42 | 0,39  | 0,36  | 0,34  |
| Ac. butírico                  | ND                | 0,05  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND   | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | 0,41              | 0,37  | 0,40  | 0,81  | 0,37  | 0,19  | 0,54  | 0,46  | 0,93              | 2,14  | 2,80  | 0,81  | 2,25 | 0,69  | 0,28  | 0,36  |
| Ac. valérico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND   | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | ND                | ND    | ND    | ND    | 0,31  | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND   | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | 663               | 539   | 515   | 385   | 674   | 645   | 430   | 390   | 237               | 556   | 483   | 461   | 543  | 625   | 385   | 270   |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado

**Tabela A.8 – Resultado das análises do percolado das Leiras V3 e V4, Fase 1 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana (Leira V3) |       |       |       |       |       |       |       | Semana (Leira V4) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| pH                            | -                 | -     | -     | -     | 7,49  | 7,48  | 7,50  | 7,49  | -                 | -     | -     | -     | 7,46  | 7,00  | 7,10  | 7,25  |
| DQO                           | 262               | 150   | 190   | 200   | 300   | 300   | 230   | 230   | 510               | 390   | 350   | 340   | 420   | 380   | 380   | 390   |
| DBO <sub>5</sub>              | 360               | -     | 60    | 16    | 30    | 16    | 4     | 10    | 48                | -     | 70    | 22    | 16    | 7     | 6     | 6     |
| NTK                           | 1,4               | ND    | ND    | 1,0   | 1,1   | 5,0   | 3,4   | 2,5   | 0,8               | 8,0   | ND    | 2,8   | 3,9   | 4,5   | 2,2   | 2,5   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1,4               | ND    | ND    | -     | -     | -     | -     | -     | 0,8               | 8,0   | ND    | -     | -     | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 203               | ND    | ND    | ND    | ND    | 1,38  | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1320              | 839   | 217   | 833   | 1040  | 1209  | 1676  | 3752  | 1335              | 900   | 695   | 825   | 1658  | 1852  | 1703  | 4011  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND                | 0,32  | 0,04  | ND    | ND    | 0,36  | ND    | 0,16  | 2,26              | 0,80  | 0,24  | 0,35  | 0,31  | 0,36  | 0,39  | ND    |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 983               | 141   | 13,2  | 311   | 279   | 129   | 170   | 170   | 385               | 209   | 132   | 190   | 102   | 91    | 86    | 105   |
| K                             | -                 | 4,94  | 4,46  | 4,53  | 5,65  | 8,48  | 7,71  | 5,55  | 10,9              | 8,53  | 9,37  | 9,82  | 8,56  | 10,7  | 10,9  | 8,56  |
| Ca                            | -                 | 21,9  | 20,1  | 10,1  | 21,9  | 27,1  | 27,1  | 22,3  | 27,8              | 22,8  | 23,8  | 21,9  | 22,5  | 21,3  | 27,1  | 22,9  |
| Mg                            | -                 | 12,6  | 11,5  | 11,9  | 17,8  | 12,5  | 12,2  | 11,8  | 13,6              | 14,1  | 12,8  | 12,6  | 18,4  | 14,7  | 14,3  | 16,9  |
| Mn                            | -                 | 0,02  | ND    | 0,04  | ND    | 0,09  | ND    | ND    | 0,16              | 0,11  | ND    | ND    | ND    | 0,42  | 0,64  | ND    |
| Fe                            | -                 | 0,30  | 0,26  | 0,93  | 0,21  | 0,44  | 0,53  | 0,02  | 0,30              | 0,33  | 0,49  | 1,07  | 0,28  | 0,44  | 0,44  | 0,07  |
| Cu                            | -                 | 0,06  | 0,05  | 0,05  | 0,03  | 0,06  | 0,09  | 0,04  | 0,04              | 0,07  | 0,05  | 0,06  | 0,05  | 0,07  | 0,08  | 0,02  |
| Zn                            | -                 | 0,06  | 0,07  | 0,08  | 0,02  | 0,07  | 0,05  | 0,01  | 0,04              | 0,05  | 0,09  | 0,06  | 0,03  | 0,08  | 0,09  | 0,02  |
| Na                            | -                 | 12,9  | 4,19  | 5,63  | 4,82  | -     | 12,9  | 4,34  | 5,98              | 12,9  | 4,84  | 9,43  | 3,97  | -     | 10,9  | 4,07  |
| Pb                            | -                 | 0,069 | 0,019 | 0,063 | 0,019 | 0,069 | 0,069 | 0,019 | 0,069             | 0,084 | 0,063 | 0,041 | 0,041 | 0,069 | 0,063 | 0,041 |
| Ni                            | -                 | ND    | 0,016 | ND    | ND    | 0,010 | ND    | ND    | ND                | 0,010 | 0,016 | ND    | ND    | 0,010 | ND    | ND    |
| Cd                            | -                 | 0,001 | 0,003 | 0,009 | 0,005 | 0,007 | 0,007 | ND    | 0,009             | 0,007 | 0,001 | 0,005 | 0,001 | 0,009 | 0,007 | 0,001 |
| Cr                            | -                 | 0,010 | ND    | 0,015 | 0,010 | 0,041 | 0,020 | 0,026 | 0,030             | 0,010 | 0,005 | 0,015 | 0,015 | 0,041 | 0,015 | 0,026 |
| Ac. acético                   | 0,93              | 1,53  | 1,06  | 1,14  | 0,48  | 0,86  | 0,90  | 1,28  | 1,08              | 0,92  | 0,97  | 0,73  | 2,99  | 2,18  | 0,62  | 2,57  |
| Ac. propiônico                | 0,70              | 0,58  | 0,23  | 0,24  | 0,45  | 0,94  | 0,58  | 0,58  | 0,40              | 0,73  | 0,29  | 0,80  | 0,27  | 0,48  | 0,36  | 1,52  |
| Ac. butírico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,13  | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | 0,81              | 2,13  | 2,22  | 0,98  | 0,40  | 0,05  | 0,24  | 1,41  | 0,67              | 0,87  | 0,40  | 1,72  | 1,29  | 0,26  | 0,28  | ND    |
| Ac. valérico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,92  | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | 369               | 420   | 429   | 408   | 567   | 660   | 523   | 370   | 1071              | 951   | 804   | 596   | 786   | 1045  | 755   | 660   |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado

**Tabela A.9 – Resultado das análises do percolado das Leiras V5 e V6, Fase 1 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana (Leira V5) |       |       |       |       |       |       |      | Semana (Leira V6) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8    | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| pH                            | -                 | -     | -     | -     | 7,05  | 7,28  | 7,32  | 7,31 | -                 | -     | -     | -     | 7,44  | 7,26  | 7,34  | 7,44  |
| DQO                           | 560               | 400   | 380   | 320   | 380   | 250   | 300   | 270  | 260               | 220   | 190   | 250   | 330   | 330   | 300   | 270   |
| DBO <sub>5</sub>              | 44                | -     | 60    | 8     | 12    | 10    | 4     | 10   | 66                | -     | 70    | 18    | 50    | 24    | 4     | 20    |
| NTK                           | 1,2               | 10,0  | ND    | 3,4   | 2,8   | 5,6   | 2,8   | 2,4  | 0,8               | ND    | ND    | 1,7   | 1,7   | 5,0   | 4,5   | 2,2   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1,2               | 10,0  | ND    | -     | -     | -     | -     | -    | 0,8               | ND    | ND    | -     | -     | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 125               | ND    | ND    | ND    | 10,9  | 0,41  | 0,49  | 9,06 | 31,7              | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1510              | 900   | 649   | 727   | 1210  | 891   | 912   | 983  | 1339              | 895   | 690   | 869   | 1989  | 1717  | 1928  | 3857  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND                | 0,80  | 0,55  | 0,76  | 0,87  | 0,71  | 1,29  | ND   | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,15  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 203               | 209   | 186   | 163   | 116   | 80    | 102   | 111  | 275               | 179   | 162   | 182   | 135   | 99    | 110   | 100   |
| K                             | 10,8              | 7,31  | 7,87  | 5,42  | 7,89  | 5,09  | 4,81  | 7,88 | -                 | 8,19  | 5,94  | 6,32  | 5,61  | 10,7  | 10,8  | 5,60  |
| Ca                            | 27,8              | 22,6  | 23,6  | 25,2  | 22,6  | 24,7  | 27,3  | 27,4 | -                 | 21,3  | 27,1  | 32,6  | 21,7  | 27,1  | 27,1  | 25,9  |
| Mg                            | 8,97              | 8,97  | 10,8  | 9,51  | 17,1  | 7,49  | 8,38  | 10,0 | -                 | 13,3  | 13,3  | 11,8  | 17,6  | 13,8  | 12,2  | 16,1  |
| Mn                            | 0,10              | 0,06  | ND    | ND    | ND    | 0,04  | 0,18  | ND   | -                 | 0,11  | ND    | 0,05  | ND    | 0,16  | ND    | ND    |
| Fe                            | 0,33              | 0,28  | 0,40  | 1,16  | 0,19  | 0,40  | 0,56  | 0,07 | -                 | 0,26  | 0,60  | 1,07  | 0,19  | 0,49  | 0,69  | 0,09  |
| Cu                            | 0,01              | 0,07  | 0,04  | 0,04  | 0,04  | 0,07  | 0,08  | 0,04 | -                 | 0,08  | 0,05  | 0,03  | 0,04  | 0,07  | 0,06  | 0,04  |
| Zn                            | ND                | 0,06  | 0,09  | 0,06  | 0,02  | 0,08  | 0,07  | 0,01 | -                 | 0,07  | 0,07  | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,10  | 0,04  |
| Na                            | 5,74              | 1,42  | 2,87  | 1,40  | 2,87  | -     | 1,22  | 3,56 | -                 | 12,9  | 8,57  | 12,9  | 4,74  | -     | 12,8  | 4,30  |
| Pb                            | 0,069             | 0,084 | 0,019 | 0,019 | 0,041 | 0,084 | 0,064 | ND   | -                 | 0,063 | 0,041 | 0,019 | 0,063 | 0,084 | 0,041 | 0,041 |
| Ni                            | ND                | 0,005 | 0,005 | 0,010 | ND    | ND    | ND    | ND   | -                 | 0,016 | 0,005 | 0,005 | ND    | ND    | 0,005 | ND    |
| Cd                            | 0,009             | 0,007 | 0,001 | 0,005 | ND    | 0,001 | 0,001 | ND   | -                 | 0,009 | 0,009 | 0,009 | ND    | 0,009 | 0,009 | ND    |
| Cr                            | 0,026             | 0,015 | 0,005 | 0,010 | 0,015 | 0,047 | 0,015 | ND   | -                 | 0,010 | ND    | 0,020 | 0,031 | 0,036 | 0,020 | 0,015 |
| Ac. acético                   | 1,08              | 0,92  | 0,97  | 1,18  | 1,09  | 0,87  | 1,31  | 0,99 | 1,28              | 1,52  | 0,98  | 1,01  | 1,48  | 2,50  | 1,60  | 0,54  |
| Ac. propiônico                | 0,40              | 0,73  | 0,29  | 0,77  | 0,34  | 0,32  | 0,34  | 0,56 | 0,87              | 0,46  | 0,48  | 0,09  | 0,63  | 0,49  | 0,18  | 0,38  |
| Ac. butírico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND   | ND                | ND    | ND    | 0,72  | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | 0,67              | 0,87  | 0,40  | 0,69  | 0,67  | 0,86  | 0,61  | 1,63 | 0,99              | 0,44  | 1,94  | 0,73  | 0,36  | 0,05  | 0,39  | 1,25  |
| Ac. valérico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND   | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND   | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | 693               | 983   | 818   | 651   | 821   | 945   | 855   | 766  | 735               | 804   | 821   | 737   | 880   | 995   | 870   | 790   |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado

**Tabela A.10 – Resultado das análises do percolado das Leiras V7 e V8, Fase 1 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana (Leira V7) |       |       |       |       |       |       |       | Semana (Leira V8) |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| pH                            | -                 | -     | -     | -     | 7,42  | 6,71  | 6,91  | 7,43  | -                 | -     | -     | -     | 6,95  | 7,05  | 7,00  | 7,00  |
| DQO                           | 530               | 400   | 340   | 380   | 450   | 440   | 390   | 430   | 520               | 430   | 300   | 290   | 290   | 180   | 200   | 190   |
| DBO <sub>5</sub>              | 48                | -     | 70    | 16    | 100   | 16    | 6     | 12    | 30                | -     | 60    | 12    | 14    | 11    | 8     | 40    |
| NTK                           | 1,1               | 7,0   | ND    | 2,8   | 1,1   | 6,7   | 3,9   | 2,5   | 0,8               | 8,0   | 3,0   | 2,8   | 2,2   | 3,9   | 2,8   | 1,6   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1,1               | 7,0   | ND    | -     | -     | -     | -     | -     | 0,8               | 8,0   | 3,0   | -     | -     | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | 138               | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 300               | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 659               | 880   | 693   | 854   | 1682  | 1389  | 1895  | 3393  | 1640              | 736   | 614   | 709   | 935   | 806   | 614   | 627   |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND                | 0,75  | 0,34  | 0,55  | 0,42  | 0,55  | 0,57  | 1,45  | ND                | 1,07  | 0,72  | 1,11  | 1,71  | 0,98  | 0,72  | 2,02  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 98                | 107   | 81    | 95    | 57    | 43    | 184   | 73    | 329               | 114   | 102   | 92    | 716   | 49    | 102   | 143   |
| K                             | 10,8              | 8,28  | 6,25  | 10,0  | 6,06  | 10,9  | 10,9  | 6,12  | 10,9              | 7,26  | 9,83  | 4,40  | 5,60  | 4,28  | 3,82  | 4,59  |
| Ca                            | 27,0              | 22,8  | 26,1  | 20,8  | 22,8  | 24,9  | 27,1  | 22,1  | 27,1              | 23,3  | 23,2  | 26,4  | 22,1  | 25,1  | 24,4  | 21,3  |
| Mg                            | 12,8              | 14,4  | 13,6  | 11,6  | 17,1  | 12,7  | 12,1  | 16,6  | 6,70              | 10,9  | 9,24  | 9,81  | 9,30  | 10,1  | 8,30  | 6,49  |
| Mn                            | 0,06              | 0,14  | 0,36  | 0,05  | 0,03  | 0,26  | 0,11  | ND    | ND                | 0,10  | ND    | 0,06  | ND    | 0,06  | ND    | ND    |
| Fe                            | 0,21              | 0,21  | 0,51  | 0,14  | 0,23  | 0,86  | 0,65  | 0,19  | 0,25              | 0,30  | 0,72  | 0,28  | 0,21  | 1,19  | 0,72  | 0,16  |
| Cu                            | 0,08              | 0,08  | 0,04  | 0,05  | 0,05  | 0,08  | 0,06  | 0,04  | 0,08              | 0,05  | 0,04  | 0,05  | 0,04  | 0,05  | 0,07  | 0,02  |
| Zn                            | 0,02              | 0,06  | 0,08  | 0,05  | 0,05  | 0,08  | 0,08  | 0,03  | 0,04              | 0,06  | 0,09  | 0,07  | 0,01  | 0,06  | 0,03  | 0,03  |
| Na                            | 6,10              | 12,9  | 1,86  | 12,9  | 4,67  | -     | 12,9  | 4,19  | 6,29              | 1,39  | 10,0  | 1,20  | 2,77  | -     | 1,20  | 2,68  |
| Pb                            | 0,063             | 0,063 | 0,084 | 0,084 | 0,019 | 0,069 | 0,041 | 0,019 | 0,041             | 0,063 | 0,019 | 0,063 | ND    | 0,063 | 0,041 | ND    |
| Ni                            | 0,005             | 0,021 | ND    | 0,005 | ND    | ND    | 0,020 | ND    | ND                | 0,021 | ND    | 0,016 | ND    | 0,016 | ND    | ND    |
| Cd                            | 0,009             | 0,007 | 0,005 | 0,007 | ND    | 0,007 | 0,007 | ND    | 0,007             | 0,009 | 0,001 | 0,003 | ND    | 0,007 | 0,003 | ND    |
| Cr                            | 0,036             | 0,010 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,026 | 0,020 | 0,015 | 0,036             | 0,005 | 0,015 | 0,015 | 0,020 | 0,026 | 0,015 | 0,015 |
| Ac. acético                   | 0,86              | 3,83  | 2,00  | 0,59  | 1,18  | 1,00  | 0,83  | 0,90  | ND                | 0,76  | 1,30  | 0,81  | 0,98  | 0,91  | 0,80  | 1,02  |
| Ac. propiônico                | 0,44              | 1,91  | 0,53  | 0,48  | 0,52  | 1,55  | 0,49  | 0,37  | 0,80              | 0,84  | 2,28  | 0,47  | 0,16  | 0,10  | 0,61  | 0,39  |
| Ac. butírico                  | ND                | 0,62  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | 0,92              | 1,48  | 0,25  | 1,03  | 0,31  | 0,39  | 0,18  | 1,74  | 0,09              | 1,45  | 2,51  | 0,72  | 0,06  | 0,50  | 0,03  | 0,53  |
| Ac. valérico                  | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                | ND    | 2,70  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | 1308              | 1415  | 1159  | 1166  | 1146  | 1390  | 1165  | 1165  | 1024              | 1486  | 1149  | 1153  | 1440  | 1325  | 1125  | 1148  |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado

**Tabela A.11 – Resultado das análises do percolado das Leiras V9 e V10, Fase 1**

| Parâmetro<br>(mg/l, exceto pH) | Semana (Leira V9) |       |       |       |       |       |       |       | Semana (Leira V10) |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 1                 | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| pH                             | -                 | -     | -     | -     | 7,34  | 7,08  | 7,02  | 7,12  | -                  | -     | -     | -     | 7,08  | 7,27  | 7,18  | 7,25  |
| DQO                            | 190               | 180   | 230   | 370   | 420   | 420   | 330   | 380   | 500                | 380   | 430   | 470   | 500   | 470   | 510   | 500   |
| DBO <sub>5</sub>               | 30                | -     | 60    | 20    | 70    | 11    | 9     | 5     | 40                 | -     | 100   | 60    | 20    | 24    | 20    | 200   |
| NTK                            | 1,4               | ND    | 10    | 2,6   | 1,7   | 6,2   | 2,2   | 1,5   | 1,7                | 9,0   | 13    | 1,1   | 6,2   | 2,8   | 1,7   | 2,6   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | 1,4               | ND    | 10    | -     | -     | -     | -     | -     | 1,7                | 7,0   | 13    | -     | -     | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | 2,28              | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 1448               | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 1044              | 889   | 673   | 830   | 1018  | 1187  | 1546  | 429   | 787                | 873   | 698   | 892   | 1691  | 1141  | 1397  | 3554  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>  | 3,00              | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,57  | ND                 | 0,58  | 0,50  | 0,72  | ND    | 0,33  | 0,48  | 1,01  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>  | 202               | 250   | 88    | 115   | 85    | 30    | 54    | 108   | 198                | 94    | 70    | 77    | 57    | 20    | 24    | 85    |
| K                              | 5,26              | 4,81  | 7,14  | 8,06  | 7,69  | 10,9  | 10,9  | 7,96  | 10,9               | 9,26  | 10,6  | 10,8  | 8,31  | 10,9  | 10,9  | 8,94  |
| Ca                             | 20,8              | 22,8  | 27,1  | 27,1  | 23,3  | 27,1  | 27,1  | 27,6  | 27,0               | 23,4  | 20,4  | 22,9  | 27,1  | 22,7  | 19,9  | 21,4  |
| Mg                             | 11,7              | 14,3  | 14,2  | 11,8  | 17,6  | 13,3  | 12,5  | 16,6  | 12,2               | 15,1  | 14,6  | 13,4  | 17,7  | 12,9  | 14,1  | 17,2  |
| Mn                             | ND                | ND    | 0,51  | 0,18  | ND    | 0,32  | 0,10  | ND    | 0,14               | 0,39  | 0,39  | 0,40  | 0,25  | 0,62  | 0,82  | 0,08  |
| Fe                             | 0,23              | 0,33  | 0,74  | 0,21  | 0,23  | 0,98  | 1,11  | 0,72  | 0,30               | 0,37  | 0,91  | 0,33  | 0,30  | 0,77  | 0,98  | 0,30  |
| Cu                             | 0,06              | 0,07  | 0,06  | 0,06  | 0,02  | 0,08  | 0,06  | 0,02  | 0,08               | 0,06  | 0,06  | 0,05  | 0,03  | 0,07  | 0,09  | 0,03  |
| Zn                             | 0,06              | 0,04  | 0,09  | 0,09  | 0,04  | 0,08  | 0,07  | 0,04  | 0,08               | 0,07  | 0,09  | 0,09  | 0,04  | 0,06  | 0,06  | 0,03  |
| Na                             | 5,19              | 12,9  | 12,9  | 12,9  | 5,12  | -     | 12,9  | 5,67  | 7,33               | 12,9  | 12,9  | 12,9  | 6,76  | -     | 12,9  | 6,80  |
| Pb                             | 0,084             | 0,084 | 0,063 | 0,069 | 0,041 | 0,084 | 0,041 | 0,019 | 0,063              | 0,069 | 0,041 | 0,084 | 0,041 | 0,084 | 0,039 | 0,019 |
| Ni                             | 0,040             | ND    | 0,010 | ND    | ND    | ND    | 0,010 | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,020 | ND    | ND    |
| Cd                             | 0,007             | 0,009 | 0,009 | 0,005 | 0,001 | 0,007 | 0,007 | ND    | 0,009              | 0,009 | 0,005 | 0,005 | ND    | 0,003 | 0,005 | 0,001 |
| Cr                             | 0,047             | 0,010 | 0,015 | 0,020 | 0,031 | 0,026 | 0,020 | 0,026 | 0,041              | 0,020 | 0,020 | 0,010 | 0,031 | 0,020 | 0,020 | 0,031 |
| Ac. acético                    | 0,98              | 1,26  | 1,48  | 1,09  | 0,53  | 1,42  | 0,62  | 1,15  | 0,85               | 1,59  | 1,20  | 1,68  | 0,54  | 0,85  | 0,69  | 3,09  |
| Ac. propiônico                 | 0,33              | 0,09  | 0,48  | 0,54  | 0,20  | 0,94  | 0,36  | 0,29  | 0,39               | 0,41  | 1,00  | 0,99  | 0,76  | 1,12  | 0,27  | 1,37  |
| Ac. butírico                   | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,24  | ND    | ND    | ND                 | ND    | ND    | 0,03  | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico               | 0,60              | 0,30  | 0,61  | ND    | 0,35  | 0,69  | ND    | 0,68  | 0,29               | 0,98  | 1,22  | 0,19  | 0,16  | 0,22  | 0,71  | ND    |
| Ac. valérico                   | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico               | ND                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)           | 960               | 1230  | 1149  | 1132  | 1280  | 1365  | 1205  | 1170  | 1730               | 1853  | 1576  | 1532  | 1840  | 1795  | 1600  | 1084  |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado

**Tabela A.12 – Resultado das análises do percolado das Leiras V11 e V12, Fase 1**

| Parâmetro<br>(mg/l, exceto pH) | Semana (Leira V11) |       |       |       |       |       |       |       | Semana (Leira V12) |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 1                  | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| pH                             | -                  | -     | -     | -     | 6,89  | 6,91  | 7,00  | 7,01  | -                  | -     | -     | -     | 7,01  | 6,82  | 6,87  | 7,38  |
| DQO                            | 480                | 360   | 230   | 220   | 310   | 180   | 190   | 190   | 500                | 370   | 320   | 380   | 510   | 370   | 460   | 420   |
| DBO <sub>5</sub>               | 40                 | -     | 40    | 80    | 40    | 12    | 17    | 12    | 30                 | -     | 120   | 6     | 20    | 15    | 15    | 12    |
| NTK                            | 1,1                | 5,0   | ND    | 2,1   | 7,3   | 8,4   | 6,7   | 2,2   | 1,4                | 9,0   | 11,0  | 2,5   | 1,7   | 3,9   | 2,2   | 1,4   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | 1,1                | 5,0   | ND    | -     | -     | -     | -     | -     | 1,4                | 6,0   | 11,0  | -     | -     | -     | -     | -     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | 621                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,32  | ND    | 184                | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 1419               | 637   | 513   | 579   | 1691  | 626   | 507   | 2063  | 1042               | 960   | 645   | 831   | 999   | 1487  | 1290  | 3826  |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>  | ND                 | 1,19  | 0,85  | 1,19  | 0,86  | 1,31  | 1,33  | 0,40  | ND                 | 1,24  | 0,51  | 1,18  | 1,14  | 0,89  | 0,51  | ND    |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>  | 471                | 71    | 66    | 81    | 53    | 41    | 59    | 74    | 144                | 79    | 41    | 67    | 56    | 34    | 46    | 137   |
| K                              | 10,9               | 6,93  | 4,71  | 10,6  | 8,36  | 3,27  | 3,04  | 8,37  | 10,9               | 9,95  | 10,7  | 3,53  | 5,98  | -     | 10,9  | 5,84  |
| Ca                             | 27,1               | 24,4  | 25,4  | 22,2  | 23,3  | 23,5  | 26,6  | 21,1  | 23,3               | 22,5  | 22,6  | 25,9  | 27,5  | -     | 20,2  | 25,4  |
| Mg                             | 14,1               | 11,7  | 10,6  | 11,1  | 8,84  | 14,1  | 14,4  | 5,00  | 14,1               | 14,2  | 12,4  | 13,0  | 17,7  | 14,2  | 14,6  | 15,5  |
| Mn                             | 0,18               | 0,04  | 0,11  | 0,27  | ND    | 0,18  | 0,05  | ND    | 0,08               | 0,06  | 0,18  | 0,03  | 0,06  | -     | 0,41  | ND    |
| Fe                             | 0,33               | 0,33  | 1,49  | 0,42  | 0,19  | 1,35  | 1,63  | 0,37  | 0,47               | 0,42  | 1,26  | 0,84  | 0,63  | -     | 1,91  | 0,72  |
| Cu                             | 0,07               | 0,05  | 0,04  | 0,06  | 0,04  | 0,06  | 0,07  | 0,04  | 0,04               | 0,09  | 0,05  | 0,06  | 0,04  | -     | 0,06  | 0,03  |
| Zn                             | 0,08               | 0,06  | 0,08  | 0,09  | 0,02  | 0,07  | 0,07  | 0,02  | 0,02               | 0,09  | 0,08  | 0,04  | 0,03  | -     | 0,06  | 0,04  |
| Na                             | 6,48               | 0,83  | 1,08  | 12,9  | 2,79  | -     | 0,36  | 2,60  | 6,03               | -     | 12,9  | 0,60  | 7,34  | -     | 11,2  | 7,34  |
| Pb                             | 0,041              | 0,063 | 0,019 | 0,084 | 0,019 | 0,069 | 0,063 | 0,019 | 0,069              | 0,069 | 0,063 | 0,041 | 0,063 | -     | 0,069 | 0,019 |
| Ni                             | ND                 | ND    | ND    | 0,005 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                 | ND    | 0,020 | 0,010 | ND    | -     | 0,005 | ND    |
| Cd                             | 0,009              | 0,007 | 0,005 | 0,003 | 0,001 | 0,001 | 0,009 | ND    | 0,007              | 0,009 | 0,009 | 0,003 | 0,003 | -     | 0,009 | 0,003 |
| Cr                             | 0,047              | 0,031 | 0,015 | 0,011 | 0,026 | 0,020 | 0,020 | 0,020 | 0,041              | 0,036 | 0,015 | 0,020 | 0,041 | 0,015 | -     | 0,019 |
| Ac. acético                    | 1,52               | 1,79  | 1,32  | 0,95  | ND    | 1,15  | 1,30  | 1,30  | 1,27               | 1,78  | 1,56  | 1,41  | 1,65  | 1,74  | 0,85  | 1,50  |
| Ac. propiônico                 | 0,08               | 0,39  | 0,83  | 0,19  | 0,76  | 1,62  | 0,43  | 0,37  | 0,27               | 1,56  | 1,61  | 0,14  | 0,41  | 1,37  | 0,36  | 0,19  |
| Ac. butírico                   | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,37  | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico               | 0,07               | 1,48  | 0,80  | 0,83  | 0,16  | 0,59  | 1,33  | 1,77  | 0,07               | 0,25  | 0,80  | 1,52  | 0,36  | 0,56  | 0,28  | 0,64  |
| Ac. valérico                   | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico               | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND                 | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)           | 1390               | 1838  | 1680  | 1597  | 1465  | 1825  | 1460  | 1622  | 1692               | 1548  | 1613  | 1477  | 1644  | 1780  | 1455  | 1110  |

Obs.: Início da primeira semana em 27/01/97

ND: Não detectado



**Tabela A.13 - Caracterização do lixiviado bruto afluente, ao longo da realização da Fase 2 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| pH                            | 7,4    | 7,7   | 7,4   | 7,6   | 7,7   | 7,7   | 7,8   | 7,6   | 7,5   | 7,4   |
| DQO                           | 1.730  | 780   | 2.160 | 1.620 | 1.650 | 1.150 | 1.280 | 1.200 | 960   | 820   |
| DBO <sub>5</sub>              | 1.120  | 158   | 280   | 1.265 | 354   | 166   | 990   | 30    | 580   | 88    |
| NTK                           | 1.080  | 1.090 | 1.225 | 1.190 | 1.036 | 990   | 860   | 798   | 588   | 602   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 1.060  | 1.075 | 1.100 | 1.140 | 980   | 960   | 848   | 739   | 577   | 577   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 3,32   | -     | 5,00  | 0,12  | -     | 15,72 | 50,04 | 21,52 | 4,00  | -     |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 4,00   | -     | 2,20  | 5,72  | -     | ND    | 9,88  | 1,04  | 1,04  | -     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 13,64  | -     | 4,40  | 10,04 | -     | 64,92 | 48,16 | 44,88 | 29,04 | -     |
| K                             | 15,05  | 10,98 | 15,78 | 11,96 | 14,32 | 15,05 | 14,32 | 15,41 | 14,69 | 13,98 |
| Ca                            | 14,22  | 23,26 | 13,24 | 22,00 | 13,59 | 12,91 | 13,07 | 14,40 | 12,97 | 13,72 |
| Mg                            | 12,45  | 19,63 | 12,91 | 19,72 | 12,45 | 12,49 | 13,30 | 12,45 | 12,53 | 19,35 |
| Mn                            | 0,06   | 0,06  | 0,07  | 0,07  | 0,06  | 0,03  | 0,04  | 0,04  | 0,03  | 0,06  |
| Fe                            | 8,74   | 9,05  | 13,39 | 8,20  | 9,93  | 4,61  | 8,71  | 13,32 | 8,99  | 8,39  |
| Cu                            | 0,04   | 0,02  | 0,06  | 0,02  | 0,05  | 0,05  | 0,06  | 0,07  | 0,06  | 0,02  |
| Zn                            | 0,04   | 0,04  | 0,04  | 0,03  | 0,08  | 0,04  | 0,04  | 0,03  | 0,03  | 0,04  |
| Na                            | 4,53   | 3,33  | 4,69  | 2,26  | 4,18  | 4,78  | 4,05  | 4,25  | 4,61  | 2,38  |
| Pb                            | 0,04   | 0,02  | 0,05  | 0,02  | 0,04  | 0,04  | 0,05  | 0,05  | 0,06  | 0,02  |
| Ni                            | 0,03   | 0,02  | 0,03  | 0,01  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,03  | 0,01  |
| Cd                            | 0,02   | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  | 0,02  |
| Cr                            | 0,12   | 0,08  | 0,09  | 0,07  | 0,12  | 0,07  | 0,06  | 0,09  | 0,09  | 0,06  |
| Ac. acético                   | ND     | -     | 0,96  | -     | ND    | 2,90  | -     | 0,45  | 2,43  | -     |
| Ac. propiônico                | ND     | -     | ND    | -     | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | -     |
| Ac. butírico                  | ND     | -     | ND    | -     | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | -     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | -     | ND    | -     | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | -     |
| Ac. valérico                  | ND     | -     | ND    | -     | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | -     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | -     | ND    | -     | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | -     |

Obs.: Início da primeira semana em 05/05/97

ND: Não detectado

**Tabela A.14 – Resultados das análises do percolado da Leira V2, Fase 2 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| pH                            | VI     | 7,1   | 7,1   | 8,0   | 6,5   | 7,9   | 7,3   | 7,1   | 7,3   | 7,0   |
| DQO                           | VI     | 420   | 816   | 392   | 664   | 380   | 420   | 390   | 870   | 400   |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | 31    | 392   | 24    | 43    | 76    | 10    | 2     | 16    | 24    |
| NTK                           | VI     | 12    | 13    | 2,2   | 157   | 35    | 26    | 2,2   | 3,4   | 7,8   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | 10    | 8,4   | 2     | 153   | 31    | 23    | 2,2   | ND    | 5,6   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | ND    | -     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | 441   | 563   | 582   | 535   | -     | 771   | 760   | 715   | -     |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | 0,20  | ND    | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | ND    | -     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | 62    | 144   | 132   | 107   | -     | 145   | 126   | 113   | -     |
| K                             | VI     | 12,14 | 14,69 | 14,14 | 13,98 | 13,81 | 14,40 | 14,14 | 14,70 | 15,05 |
| Ca                            | VI     | 13,95 | 13,57 | 12,38 | 13,07 | 13,87 | 12,58 | 10,39 | 11,96 | 12,71 |
| Mg                            | VI     | 12,68 | 12,73 | 12,40 | 12,36 | 12,81 | 12,40 | 12,31 | 12,15 | 12,07 |
| Mn                            | VI     | 0,056 | 0,050 | 0,054 | 0,050 | 0,040 | 0,020 | 0,030 | 0,040 | 0,024 |
| Fe                            | VI     | 8,17  | 8,53  | 8,65  | 6,73  | 7,04  | 1,38  | 6,28  | 9,03  | 6,21  |
| Cu                            | VI     | 0,015 | 0,020 | 0,015 | 0,020 | 0,010 | 0,015 | 0,020 | 0,025 | 0,015 |
| Zn                            | VI     | 0,020 | 0,017 | 0,018 | 0,016 | 0,019 | 0,019 | 0,017 | 0,018 | 0,017 |
| Na                            | VI     | 5,24  | 4,79  | 4,19  | 4,35  | 4,69  | 4,23  | 3,90  | 4,24  | 3,93  |
| Pb                            | VI     | 0,023 | 0,018 | 0,023 | 0,028 | 0,018 | 0,013 | 0,018 | 0,023 | 0,028 |
| Ni                            | VI     | 0,014 | 0,011 | 0,013 | 0,016 | 0,014 | 0,013 | 0,011 | 0,014 | 0,016 |
| Cd                            | VI     | 0,006 | 0,003 | 0,009 | 0,006 | 0,003 | 0,006 | 0,006 | 0,009 | 0,006 |
| Cr                            | VI     | 0,012 | ND    | 0,012 | 0,012 | 0,023 | 0,023 | 0,023 | 0,035 | 0,012 |
| Ac. acético                   | VI     | 0,87  | 0,80  | 2,15  | 2,44  | 0,92  | 3,62  | 1,06  | 2,04  | 1,23  |
| Ac. propiônico                | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. butírico                  | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. valérico                  | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | VI     | 141   | 328   | 378   | 838   | 474   | 345   | 427   | 524   | 630   |

Obs.: Início da primeira semana em 05/05/97

VI: Volume insuficiente.

ND: Não detectado

**Tabela A.15 – Resultados das análises do percolado da Leira V5, Fase 2 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| pH                            | 8,1    | 7,5   | 7,9   | 7,8   | 7,5   | 7,8   | 7,6   | 7,5   | 7,3   | 7,2   |
| DQO                           | 1.100  | 712   | 392   | 680   | 816   | 380   | 620   | 440   | 900   | 536   |
| DBO <sub>5</sub>              | 340    | 160   | 190   | 206   | 42    | 37    | 56    | 20    | 9,2   | 38    |
| NTK                           | 302    | 14    | 8,4   | 29    | 211   | 36    | 55    | 26    | 70    | 39    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 290    | 11    | 5,6   | 27    | 196   | 35    | 51    | 26    | 65    | 36    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 214    | 438   | 609   | 564   | 541   | 586   | 725   | 858   | 703   | 637   |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 0,40   | 0,40  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 125    | 71    | 86    | 66    | 64    | 79    | 86    | 93    | 59    | 45    |
| K                             | 13,60  | 15,05 | 14,76 | 14,72 | 14,25 | 14,14 | 14,69 | 14,40 | 14,36 | 14,14 |
| Ca                            | 7,31   | 13,87 | 13,47 | 14,17 | 13,29 | 12,21 | 13,85 | 13,24 | 12,63 | 13,69 |
| Mg                            | 11,89  | 11,85 | 11,98 | 12,26 | 11,87 | 12,07 | 12,35 | 13,35 | 12,07 | 12,43 |
| Mn                            | 0,040  | 0,024 | 0,050 | 0,044 | 0,034 | 0,016 | 0,020 | 0,028 | 0,018 | 0,020 |
| Fe                            | 6,86   | 6,21  | 6,62  | 5,71  | 6,16  | 0,95  | 4,47  | 6,12  | 7,86  | 5,83  |
| Cu                            | 0,005  | 0,015 | 0,010 | 0,005 | 0,005 | 0,010 | 0,015 | 0,005 | 0,005 | 0,010 |
| Zn                            | 0,017  | 0,016 | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,015 | 0,016 | 0,017 | 0,018 | 0,017 |
| Na                            | 5,24   | 4,51  | 4,28  | 4,52  | 4,11  | 3,45  | 4,24  | 3,72  | 4,45  | 3,98  |
| Pb                            | 0,013  | 0,009 | 0,013 | 0,009 | 0,018 | 0,009 | 0,018 | 0,013 | 0,009 | 0,013 |
| Ni                            | 0,008  | 0,013 | 0,014 | 0,011 | 0,010 | 0,008 | 0,008 | 0,011 | 0,010 | 0,010 |
| Cd                            | ND     | ND    | 0,003 | ND    | ND    | 0,003 | 0,003 | ND    | ND    | ND    |
| Cr                            | 0,012  | 0,023 | 0,012 | ND    | ND    | ND    | 0,023 | 0,030 | 0,035 | ND    |
| Ac. acético                   | 0,70   | 0,62  | 0,84  | 1,52  | 2,56  | 2,82  | 2,61  | 1,24  | 1,67  | 2,29  |
| Ac. propiônico                | ND     | ND    | 0,22  | 0,27  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. butírico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. valérico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. iso-valérico              | VI     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Volume coletado (ml)          | 111    | 825   | 581   | 751   | 1.252 | 791   | 699   | 697   | 870   | 933   |

Obs.: Início da primeira semana em 05/05/97

VI: Volume insuficiente.

ND: Não detectado

**Tabela A.16 – Resultados das análises do percolado da Leira V8, Fase 2 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                               | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10     |
| pH                            | 8,3    | 7,2   | 7,3   | 7,7   | 7,2   | 7,7   | 7,1   | 7,1   | 7,5   | 7,2    |
| DQO                           | 960    | 672   | 568   | 680   | 800   | 450   | 600   | 480   | 656   | 496    |
| DBO <sub>5</sub>              | 240    | 288   | 290   | 168   | 72    | 24    | 64    | 17    | 110   | 50     |
| NTK                           | 270    | 11    | 5,6   | 6,7   | 167   | 57    | 47    | 66    | 46    | 24     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 258    | 9     | 4,2   | 6     | 160   | 50    | 43    | 39    | 43    | 21     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | -     | ND    | ND    | ND    | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 130    | 426   | 536   | 628   | 607   | -     | 752   | 1.161 | 760   | 378    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 0,96   | 0,37  | ND    | 0,32  | ND    | -     | ND    | ND    | 8,36  | 3,76   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 33,68  | 67,01 | 57,92 | 51,24 | 53,80 | -     | 59,88 | 57,12 | 75,60 | 131,64 |
| K                             | 13,96  | 13,45 | 13,09 | 14,14 | 14,32 | 14,21 | 14,03 | 14,14 | 14,69 | 14,51  |
| Ca                            | 13,67  | 12,46 | 13,35 | 13,21 | 12,76 | 13,07 | 12,00 | 12,84 | 14,17 | 12,00  |
| Mg                            | 12,36  | 12,45 | 12,48 | 12,69 | 12,38 | 12,43 | 12,53 | 12,63 | 12,66 | 12,68  |
| Mn                            | 0,05   | 0,04  | 0,06  | 0,04  | 0,05  | 0,02  | 0,03  | 0,05  | 0,04  | 0,02   |
| Fe                            | 7,29   | 7,97  | 7,52  | 7,86  | 6,34  | 2,30  | 6,21  | 6,39  | 6,62  | 7,07   |
| Cu                            | 0,015  | 0,010 | 0,020 | 0,015 | 0,005 | 0,015 | 0,020 | 0,025 | 0,015 | 0,015  |
| Zn                            | 0,028  | 0,026 | 0,024 | 0,023 | 0,022 | 0,021 | 0,024 | 0,026 | 0,024 | 0,026  |
| Na                            | 5,23   | 4,68  | 4,96  | 4,29  | 3,72  | 3,85  | 3,85  | 3,57  | 3,99  | 3,89   |
| Pb                            | 0,013  | 0,009 | 0,018 | 0,023 | 0,028 | 0,032 | 0,028 | 0,018 | 0,013 | 0,018  |
| Ni                            | 0,010  | 0,013 | 0,010 | 0,011 | 0,013 | 0,014 | 0,013 | 0,010 | 0,011 | 0,013  |
| Cd                            | 0,009  | 0,006 | 0,009 | 0,006 | 0,003 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006  |
| Cr                            | 0,012  | 0,023 | 0,032 | ND    | ND    | ND    | 0,030 | 0,012 | 0,023 | 0,030  |
| Ac. acético                   | 0,12   | 0,57  | 0,84  | 1,45  | 2,35  | 0,90  | 3,49  | 0,93  | 2,68  | 1,99   |
| Ac. propiônico                | ND     | ND    | 0,22  | 0,38  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 229    | 902   | 993   | 1.346 | 1.878 | 1.113 | 951   | 1.181 | 1.342 | 1.436  |

Obs.: Início da primeira semana em 05/05/97

VI: Volume insuficiente.

ND: Não detectado

**Tabela A.17 – Resultados das análises do percolado da Leira V11, Fase 2 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |       |       |       |       |       |       |       |        |       |
|-------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|                               | 1      | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9      | 10    |
| pH                            | 8,3    | 7,5   | 7,7   | 7,4   | 7,1   | 7,6   | 6,8   | 6,9   | 7,0    | 7,0   |
| DQO                           | 1.080  | 680   | 696   | 704   | 848   | 610   | 680   | 580   | 660    | 544   |
| DBO <sub>5</sub>              | 590    | 34    | 294   | 340   | 64    | 92    | 100   | 15    | 85     | 39    |
| NTK                           | 315    | 115   | 7     | 16    | 179   | 60    | 84    | 45    | 66     | 50    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 275    | 110   | 5,6   | 15    | 162   | 52    | 79    | 45    | 57     | 48    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 425    | 204   | 539   | 598   | 536   | 594   | 712   | 820   | 718    | 598   |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 0,40   | 0,64  | 0,40  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 66,36  | 52,32 | 48,96 | 47,20 | 47,92 | 49,00 | 45,04 | 55,48 | 112,52 | 44,12 |
| K                             | 14,40  | 14,32 | 14,14 | 14,32 | 14,69 | 14,72 | 14,32 | 14,07 | 14,03  | 14,14 |
| Ca                            | 14,53  | 13,85 | 13,14 | 12,73 | 13,82 | 11,52 | 13,45 | 13,48 | 13,35  | 13,97 |
| Mg                            | 12,38  | 11,98 | 12,07 | 12,03 | 12,10 | 12,07 | 12,15 | 11,79 | 11,87  | 12,36 |
| Mn                            | 0,048  | 0,050 | 0,056 | 0,040 | 0,050 | 0,020 | 0,020 | 0,030 | 0,026  | 0,024 |
| Fe                            | 7,97   | 8,42  | 7,97  | 6,16  | 5,94  | 6,12  | 1,65  | 6,39  | 8,22   | 6,43  |
| Cu                            | 0,015  | 0,015 | 0,010 | 0,020 | 0,015 | 0,015 | 0,003 | 0,010 | 0,005  | 0,015 |
| Zn                            | 0,021  | 0,020 | 0,022 | 0,018 | 0,017 | 0,023 | 0,022 | 0,017 | 0,017  | 0,019 |
| Na                            | 5,24   | 4,64  | 4,20  | 3,97  | 4,20  | 4,36  | 4,11  | 4,03  | 4,55   | 4,25  |
| Pb                            | 0,028  | 0,023 | 0,028 | 0,023 | 0,018 | 0,023 | 0,032 | 0,028 | 0,032  | 0,023 |
| Ni                            | 0,011  | 0,014 | 0,011 | 0,011 | 0,010 | 0,013 | 0,014 | 0,010 | 0,011  | 0,013 |
| Cd                            | 0,009  | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,009 | 0,009 | 0,006 | 0,006 | 0,009  | 0,009 |
| Cr                            | 0,012  | 0,028 | 0,023 | 0,012 | 0,012 | 0,020 | 0,012 | 0,012 | 0,012  | 0,023 |
| Ac. acético                   | 0,94   | 0,69  | 1,18  | 1,18  | 3,82  | 1,59  | 1,72  | 1,26  | 2,84   | 1,30  |
| Ac. propiônico                | ND     | ND    | 0,40  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| Ac. butírico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| Ac. valérico                  | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND     | ND    |
|                               | 376    | 1.343 | 1.528 | 1.365 | 1.794 | 1.620 | 1.364 | 1.328 | 1.869  | 1.814 |

Obs.: Início da primeira semana em 05/05/97

VI: Volume insuficiente.

ND: Não detectado

**Tabela A.18 - Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1      | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| pH                            | 7,5    | 7,4    | 7,2   | 7,8   | 7,3   | 7,6   | 7,3   | 7,6   | 7,2   | 7,3   |
| DQO                           | 960    | 820    | 784   | 928   | 1.060 | 883   | 728   | 606   | 1.150 | 1.010 |
| DBO <sub>5</sub>              | 580    | 88     | 60    | 148   | 350   | 180   | 500   | 310   | 220   | 110   |
| NTK                           | 588    | 602    | 498   | 507   | 686   | 670   | 683   | 692   | 588   | 650   |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 577    | 577    | 476   | 459   | 672   | 660   | 662   | 675   | 540   | 622   |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | -     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 4,00   | 7,75   | 2,15  | 3,18  | 4,18  | 8,14  | 1,67  | 7,33  | 6,10  | -     |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 1,04   | 13,50  | 1,53  | 2,73  | 2,15  | 1,88  | 0,85  | 1,46  | -     | -     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 29,04  | 6,90   | 20,18 | 24,25 | 21,28 | 23,87 | 15,54 | 22,64 | -     | -     |
| K                             | 14,69  | 13,98  | 18,62 | 17,75 | 17,05 | 9,70  | 9,70  | 24,22 | -     | -     |
| Ca                            | 12,973 | 13,724 | 24,02 | 25,72 | 22,00 | 23,13 | 23,73 | 21,00 | -     | 21,00 |
| Mg                            | 12,53  | 19,35  | 18,97 | 20,58 | 19,37 | 19,95 | 19,88 | 20,43 | -     | 20,15 |
| Mn                            | 0,030  | 0,060  | 0,080 | 0,072 | 0,058 | 0,044 | 0,056 | 0,082 | -     | 0,108 |
| Fe                            | 8,98   | 8,38   | 7,26  | 6,10  | 8,70  | 5,57  | 9,55  | 6,87  | -     | 7,83  |
| Cu                            | 0,062  | 0,020  | 0,031 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,015 | 0,020 | -     | 0,015 |
| Zn                            | 0,028  | 0,038  | 0,049 | 0,025 | 0,028 | 0,023 | 0,036 | 0,042 | -     | 0,035 |
| Na                            | 4,614  | 2,381  | 3,262 | 3,150 | 2,565 | 2,201 | 2,932 | 3,468 | -     | 3,093 |
| Pb                            | 0,056  | 0,018  | 0,019 | 0,023 | 0,028 | 0,029 | 0,028 | 0,019 | -     | 0,019 |
| Ni                            | 0,033  | 0,010  | 0,018 | 0,017 | 0,020 | 0,013 | 0,023 | 0,017 | -     | 0,011 |
| Cd                            | 0,023  | 0,020  | 0,017 | 0,014 | 0,014 | 0,017 | 0,017 | 0,020 | -     | 0,023 |
| Cr                            | 0,093  | 0,058  | 0,122 | 0,161 | 0,125 | 0,091 | 0,092 | 0,161 | -     | 0,150 |
| Ac. acético                   | 2,43   | ND     | 2,87  | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. propiônico                | ND     | 0,52   | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | 0,64  | ND    |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    | 0,08  | 0,35  | ND    | 0,16  | 0,34  |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    | ND    |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    | 0,37  | 0,41  | ND    | ND    | 0,11  |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND    | ND    | ND    | 0,13  | ND    | ND    | ND    | ND    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

ND: Não detectado

**Tabela A.19** - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 3**, ao início do experimento

| Parâmetro                            | Leira |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                      | V13   | V14   | V15   | V16   | V17   | V18   | V19   | V20   | V21   | V22   | V23   | V24   |
| pH                                   | 7,8   | 8,0   | 7,8   | 8,0   | 8,0   | 7,8   | 7,9   | 7,9   | 8,0   | 7,9   | 7,8   | 7,9   |
| C org.(%)                            | 8,5   | 6,3   | 9,9   | 5,7   | 8,6   | 6,4   | 11,0  | 6,0   | 6,0   | 6,0   | 6,0   | 3,4   |
| NTK (%)                              | 0,86  | 0,43  | 0,52  | 0,39  | 0,54  | 0,42  | 0,66  | 0,39  | 0,37  | 0,41  | 0,43  | 0,41  |
| P (%)                                | 0,22  | 0,17  | 0,20  | 0,14  | 0,17  | 0,14  | 0,21  | 0,15  | 0,15  | 0,15  | 0,14  | 0,15  |
| K (%)                                | 0,52  | 0,46  | 0,53  | 0,46  | 0,46  | 0,45  | 0,55  | 0,47  | 0,43  | 0,41  | 0,43  | 0,44  |
| Ca (%)                               | 0,96  | 0,55  | 0,55  | 0,81  | 0,76  | 0,41  | 0,73  | 0,61  | 0,70  | 0,74  | 0,64  | 0,70  |
| Mg (%)                               | 0,25  | 0,22  | 0,17  | 0,19  | 0,22  | 0,26  | 0,36  | 0,26  | 0,24  | 0,23  | 0,16  | 0,15  |
| Cu (mg/kg)                           | 56    | 73    | 65    | 68    | 65    | 120   | 53    | 69    | 67    | 74    | 70    | 71    |
| Zn (mg/kg)                           | 203   | 285   | 223   | 230   | 328   | 286   | 230   | 261   | 258   | 288   | 296   | 336   |
| Fe (%)                               | 4,8   | 6,1   | 4,8   | 6,2   | 5,2   | 5,8   | 4,8   | 5,4   | 6,2   | 6,1   | 5,9   | 6,1   |
| Mn (mg/kg)                           | 602   | 480   | 702   | 463   | 612   | 474   | 646   | 460   | 484   | 516   | 500   | 510   |
| S (%)                                | 0,14  | 0,10  | 0,16  | 0,10  | 0,12  | 0,10  | 0,14  | 0,09  | 0,09  | 0,10  | 0,10  | 0,09  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 55    | 61    | 60    | 56    | 27    | 27    | 30    | 27    | 28    | 41    | 36    | 28    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 179   | 226   | 194   | 250   | 82    | 198   | 166   | 206   | 206   | 190   | 233   | 227   |
| Pb (mg/kg)                           | 47    | 66    | 63    | 68    | 79    | 78    | 54    | 90    | 72    | 70    | 109   | 82    |
| Cd (mg/kg)                           | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 | < 0,9 |
| Ni (mg/kg)                           | 21    | 43    | 46    | 39    | 41    | 37    | 41    | 39    | 36    | 41    | 43    | 41    |
| Cr (mg/kg)                           | 39    | 76    | 50    | 47    | 38    | 65    | 44    | 37    | 61    | 49    | 69    | 61    |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.20** – Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 3**, aos 30 dias do experimento

| Parâmetro                            | Leira |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                      | V13   | V14  | V15  | V16  | V17  | V18  | V19  | V20  | V21  | V22  | V23  | V24  |
| pH                                   | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| C org.(%)                            | 9,3   | 5,9  | 10,3 | 5,9  | 8,3  | 5,5  | 8,2  | 5,1  | 4,8  | 5,6  | 4,6  | 5,5  |
| NTK (%)                              | 0,76  | 0,50 | 0,83 | 0,46 | 0,56 | 0,39 | 0,76 | 0,45 | 0,40 | 0,47 | 0,38 | 0,32 |
| P (%)                                | 0,22  | 0,18 | 0,22 | 0,20 | 0,19 | 0,18 | 0,24 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,17 | 0,18 |
| K (%)                                | 0,44  | 0,42 | 0,39 | 0,40 | 0,42 | 0,42 | 0,39 | 0,38 | 0,28 | 0,28 | 0,29 | 0,28 |
| Ca (%)                               | 0,86  | 0,80 | 0,65 | 0,78 | 0,70 | 0,84 | 0,82 | 0,84 | 0,84 | 0,94 | 0,84 | 0,77 |
| Mg (%)                               | 0,26  | 0,19 | 0,16 | 0,18 | 0,24 | 0,18 | 0,22 | 0,20 | 0,16 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| Cu (mg/kg)                           | 69    | 81   | 58   | 83   | 52   | 65   | 60   | 89   | 87   | 77   | 64   | 80   |
| Zn (mg/kg)                           | 252   | 336  | 208  | 272  | 177  | 319  | 241  | 934  | 270  | 283  | 339  | 286  |
| Fe (%)                               | 4,6   | 5,7  | 4,4  | 6,0  | 4,4  | 6,5  | 4,3  | 6,1  | 5,0  | 4,9  | 6,2  | 5,1  |
| Mn (mg/kg)                           | 744   | 569  | 700  | 613  | 659  | 593  | 724  | 596  | 567  | 552  | 607  | 582  |
| S (%)                                | 0,21  | 0,15 | 0,17 | 0,13 | 0,12 | 0,19 | 0,20 | 0,19 | 0,13 | 0,13 | 0,20 | 0,15 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/kg) | 57    | 78   | 150  | 116  | 172  | 235  | 208  | 190  | 18   | 24   | 14   | 16   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg) | 860   | 269  | 688  | 222  | 594  | 124  | 537  | 388  | 92   | 35   | 18   | 24   |
| Pb (mg/kg)                           | 1200  | 78   | 48   | 85   | 49   | 74   | 52   | 97   | 74   | 78   | 222  | 140  |
| Cd (mg/kg)                           | 2,6   | 2,6  | 1,9  | 2,6  | 1,6  | 2,6  | 1,9  | 2,6  | 2,6  | 2,6  | 2,0  | 2,4  |
| Ni (mg/kg)                           | 29    | 33   | 23   | 34   | 23   | 36   | 25   | 41   | 30   | 33   | 35   | 30   |
| Cr (mg/kg)                           | 587   | 351  | 210  | 444  | 182  | 217  | 226  | 277  | 232  | 257  | 225  | 345  |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.21** - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 3**, aos 60 dias do experimento

| Parâmetro                               | Leira |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | V13   | V14  | V15  | V16  | V17  | V18  | V19  | V20  | V21  | V22  | V23  | V24  |
| pH                                      | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    |
| C org.(%)                               | 12    | 6,3  | 9,6  | 6,5  | 7,6  | 6,0  | 11   | 5,0  | 4,7  | 4,5  | 4,7  | 4,8  |
| NTK (%)                                 | 0,87  | 0,53 | 0,77 | 0,58 | 0,74 | 0,52 | 0,79 | 0,37 | 0,37 | 0,46 | 0,34 | 0,52 |
| P (%)                                   | 0,24  | 0,18 | 0,21 | 0,21 | 0,22 | 0,16 | 0,26 | 0,14 | 0,18 | 0,17 | 0,18 | 0,19 |
| K (%)                                   | 0,28  | 0,27 | 0,28 | 0,28 | 0,25 | 0,27 | 0,32 | 0,26 | 0,32 | 0,30 | 0,22 | 0,34 |
| Ca (%)                                  | 0,80  | 0,76 | 0,54 | 0,72 | 0,56 | 0,52 | 0,80 | 0,47 | 1,0  | 1,5  | 1,3  | 1,1  |
| Mg (%)                                  | 0,06  | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,09 | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Cu (mg/kg)                              | 68    | 91   | 71   | 84   | 103  | 106  | 67   | 107  | 114  | 95   | 87   | 87   |
| Zn (mg/kg)                              | 262   | 351  | 295  | 328  | 265  | 392  | 267  | 328  | 367  | 339  | 331  | 321  |
| Fe (%)                                  | 4,2   | 5,3  | 4,4  | 5,4  | 4,6  | 5,4  | 3,8  | 5,3  | 5,6  | 4,4  | 4,6  | 5,1  |
| Mn (mg/kg)                              | 756   | 617  | 697  | 630  | 691  | 622  | 704  | 595  | 646  | 666  | 751  | 650  |
| S (%)                                   | 0,21  | 0,14 | 0,18 | 0,15 | 0,17 | 0,15 | 0,20 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,12 | 0,15 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg/kg) | 68    | 38   | 85   | 60   | 88   | 50   | 109  | 52   | 45   | 47   | 44   | 80   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)    | 703   | 369  | 723  | 405  | 732  | 415  | 986  | 398  | 109  | 114  | 96   | 193? |
| Pb (mg/kg)                              | 60    | 114  | 60   | 84   | 72   | 78   | 63   | 183  | 153  | 81   | 81   | 90   |
| Cd (mg/kg)                              | 1,4   | 1,7  | 1,7  | 2,0  | 1,4  | 1,2  | 0,97 | 1,4  | 2,2  | 1,7  | 1,7  | 1,4  |
| Ni (mg/kg)                              | 42    | 41   | 34   | 42   | 37   | 41   | 32   | 39   | 41   | 37   | 45   | 42   |
| Cr (mg/kg)                              | 118   | 276  | 116  | 151  | 119  | 111  | 135  | 137  | 120  | 138  | 122  | 144  |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.22** – Resultados das análises do percolato da Leira V13, **Fase 3** (mg/l, exceto pH)

| Parâmetro                     | Semana |    |    |    |      |        |    |    |    |    |
|-------------------------------|--------|----|----|----|------|--------|----|----|----|----|
|                               | 1      | 2  | 3  | 4  | 5    | 6      | 7  | 8  | 9  | 10 |
| pH                            | VI     | VI | VI | VI | 7,5  | 7,3    | VI | VI | VI | VI |
| DQO                           | VI     | VI | VI | VI | 524  | 960    | VI | VI | VI | VI |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI | VI | VI | 51   | VI     | VI | VI | VI | VI |
| NTK                           | VI     | VI | VI | VI | 18   | 11     | VI | VI | VI | VI |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | VI | VI | VI | 2,8  | 0,6    | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | VI | ND   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | VI | 388  | 401    | VI | VI | VI | VI |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | VI | VI | VI | 0,89 | 4,95   | VI | VI | VI | VI |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | VI | VI | VI | 529  | 161    | VI | VI | VI | VI |
| K                             | VI     | VI | VI | VI | VI   | 8,561  | VI | VI | VI | VI |
| Ca                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 14,798 | VI | VI | VI | VI |
| Mg                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 18,700 | VI | VI | VI | VI |
| Mn                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,060  | VI | VI | VI | VI |
| Fe                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 2,081  | VI | VI | VI | VI |
| Cu                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,005  | VI | VI | VI | VI |
| Zn                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,015  | VI | VI | VI | VI |
| Na                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,692  | VI | VI | VI | VI |
| Pb                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,014  | VI | VI | VI | VI |
| Ni                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,013  | VI | VI | VI | VI |
| Cd                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,006  | VI | VI | VI | VI |
| Cr                            | VI     | VI | VI | VI | VI   | 0,035  | VI | VI | VI | VI |
| Ac. acético                   | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. propiônico                | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. butírico                  | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-butírico              | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. valérico                  | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-valérico              | VI     | VI | VI | VI | VI   | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Volume coletado (ml)          | 4      | 0  | 0  | 0  | 67   | 102    | 0  | 0  | 0  | 0  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.23 – Resultados das análises do percolado da Leira V14, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |    |    |        |        |        |    |    |    |    |
|-------------------------------|--------|----|----|--------|--------|--------|----|----|----|----|
|                               | 1      | 2  | 3  | 4      | 5      | 6      | 7  | 8  | 9  | 10 |
| pH                            | VI     | VI | VI | 7,1    | 7,1    | 7,6    | VI | VI | VI | VI |
| DQO                           | VI     | VI | VI | 196    | 156    | 160    | VI | VI | VI | VI |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI | VI | VI     | 16     | VI     | VI | VI | VI | VI |
| NTK                           | VI     | VI | VI | 9      | 7,7    | 9      | VI | VI | VI | VI |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | VI | VI | 2,8    | 2,2    | 1,0    | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | ND     | ND     | VI     | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | 509    | 434    | VI     | VI | VI | VI | VI |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | VI | VI | ND     | 1,80   | VI     | VI | VI | VI | VI |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | VI | VI | 653    | 321    | VI     | VI | VI | VI | VI |
| K                             | VI     | VI | VI | 7,755  | 7,828  | 7,755  | VI | VI | VI | VI |
| Ca                            | VI     | VI | VI | 15,715 | 14,865 | 13,681 | VI | VI | VI | VI |
| Mg                            | VI     | VI | VI | 14,683 | 17,000 | 18,783 | VI | VI | VI | VI |
| Mn                            | VI     | VI | VI | 0,080  | 0,060  | 0,062  | VI | VI | VI | VI |
| Fe                            | VI     | VI | VI | 4,143  | 4,033  | 3,885  | VI | VI | VI | VI |
| Cu                            | VI     | VI | VI | <0,005 | <0,005 | <0,005 | VI | VI | VI | VI |
| Zn                            | VI     | VI | VI | 0,013  | 0,015  | 0,010  | VI | VI | VI | VI |
| Na                            | VI     | VI | VI | 0,917  | 0,688  | 0,830  | VI | VI | VI | VI |
| Pb                            | VI     | VI | VI | 0,010  | 0,010  | 0,014  | VI | VI | VI | VI |
| Ni                            | VI     | VI | VI | 0,013  | 0,010  | 0,008  | VI | VI | VI | VI |
| Cd                            | VI     | VI | VI | ND     | ND     | 0,003  | VI | VI | VI | VI |
| Cr                            | VI     | VI | VI | 0,012  | 0,012  | 0,012  | VI | VI | VI | VI |
| Ac. acético                   | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. propiônico                | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. butírico                  | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-butírico              | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. valérico                  | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-valérico              | VI     | VI | VI | ND     | ND     | ND     | VI | VI | VI | VI |
| Volume coletado (ml)          | 0      | 0  | 0  | 257    | 209    | 135    | 3  | 0  | 0  | 0  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.24 – Resultados das análises do percolado da Leira V15, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 7,6    | 7,7    | 7,8    | 8,0    | 7,8    | 8,2    | 8,0    | 8,1    | 7,7    | 8,1    |
| DQO                           | 700    | 700    | 328    | 520    | 400    | 448    | 440    | 448    | 672    | 576    |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI     | 23     | 30     | 28     | VI     | 7,0    | 31     | VI     | 27     |
| NTK                           | 0,8    | 29     | 18     | 3,9    | 6,1    | 10     | 5      | 4,8    | 18     | 7,8    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | 5,3    | 2,0    | 2,2    | 0,6    | ND     | 2,5    | 1,1    | 16     | 2,0    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 108    | 118    | 378    | 403    | 343    | VI     | 544    | 743    | 413    | 636    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 4,16   | 9,56   | 3,76   | ND     | 6,39   | VI     | 3,14   | 7,46   | 4,23   | 3,97   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 130    | 87     | 132    | 303    | 189    | VI     | 223    | 38     | 224    | 141    |
| K                             | 16,143 | 15,777 | 15,960 | 6,184  | 6,074  | 7,574  | 8,745  | 4,098  | 3,988  | 5,049  |
| Ca                            | 13,404 | 13,519 | 10,888 | 13,148 | 13,216 | 13,048 | 13,381 | 13,048 | 13,216 | 13,098 |
| Mg                            | 13,104 | 12,807 | 12,362 | 18,666 | 18,583 | 18,150 | 18,166 | 17,983 | 17,416 | 17,800 |
| Mn                            | 0,040  | 0,040  | 0,034  | 0,024  | 0,030  | 0,010  | 0,030  | 0,036  | 0,060  | 0,052  |
| Fe                            | 4,357  | 6,163  | 5,711  | 3,572  | 3,314  | 3,370  | 2,302  | 2,265  | 2,541  | 2,099  |
| Cu                            | 0,005  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | <0,005 | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | 0,013  | 0,012  | 0,012  | 0,005  | 0,003  | 0,002  | 0,001  | 0,005  | 0,005  | 0,006  |
| Na                            | 5,240  | 5,161  | 5,240  | 0,890  | 0,879  | 0,931  | 0,894  | 0,857  | 0,669  | 0,665  |
| Pb                            | 0,013  | 0,009  | 0,013  | 0,014  | 0,014  | 0,010  | 0,010  | 0,014  | 0,014  | 0,010  |
| Ni                            | 0,014  | 0,016  | 0,017  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,008  | 0,008  | 0,010  | 0,008  |
| Cd                            | ND     | ND     | ND     | 0,003  | 0,003  | ND     | ND     | ND     | 0,003  | 0,003  |
| Cr                            | ND     | ND     | ND     | 0,023  | 0,023  | 0,023  | 0,012  | 0,012  | 0,023  | 0,023  |
| Ac. acético                   | 1,21   | 5,08   | 2,05   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | 0,2    | 0,1    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,2    | ND     | 0,3    | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 349    | 233    | 898    | 417    | 752    | 366    | 418    | 611    | 386    | 504    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.25 – Resultados das análises do percolado da Leira V16, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 7,2    | 7,4    | 7,8    | 7,5    | 7,3    | 7,7    | 7,8    | 8,1    | 7,8    | 7,7    |
| DQO                           | 170    | 280    | 91     | 168    | 140    | 160    | 160    | 152    | 560    | 368    |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI     | 6      | 22     | 15     | VI     | 25     | 13     | VI     | 60     |
| NTK                           | 16     | 1,3    | 4      | 5,1    | 2      | 13     | 2,8    | 1,4    | 19     | 5,9    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | ND     | 1,1    | 1,7    | 1,3    | ND     | 1,7    | 0,6    | 4,9    | 0,6    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 419    | 316    | 522    | 452    | 403    | 416    | -      | 533    | 660    | 626    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND     | ND     | 6,20   | ND     | 1,54   | 1,78   | -      | 6,13   | 5,13   | ND     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 364    | 203    | 96     | 324    | 369    | 150    | -      | 202    | 234    | 199    |
| K                             | 15,391 | 15,487 | 15,341 | 4,464  | 7,757  | 7,940  | 13,832 | 9,843  | 4,940  | 19,248 |
| Ca                            | 13,288 | 12,940 | 11,964 | 15,298 | 15,181 | 14,650 | 11,465 | 11,948 | 12,515 | 12,881 |
| Mg                            | 12,807 | 12,461 | 12,643 | 18,850 | 18,866 | 16,250 | 15,900 | 17,000 | 15,850 | 16,116 |
| Mn                            | 0,036  | 0,030  | 0,032  | 0,046  | 0,040  | 0,042  | 0,040  | 0,046  | 0,040  | 0,042  |
| Fe                            | 5,034  | 6,615  | 5,937  | 3,922  | 3,954  | 4,346  | 4,327  | 2,560  | 3,738  | 4,143  |
| Cu                            | 0,010  | 0,005  | 0,010  | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,005  |
| Zn                            | 0,010  | 0,014  | 0,016  | 0,007  | 0,004  | 0,002  | 0,001  | <0,001 | 0,001  | 0,003  |
| Na                            | 5,240  | 5,124  | 4,836  | 0,714  | 0,913  | 0,875  | 0,849  | 0,819  | 0,823  | 1,287  |
| Pb                            | 0,018  | 0,018  | 0,023  | 0,014  | 0,014  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,014  | 0,010  |
| Ni                            | 0,013  | 0,014  | 0,013  | 0,008  | 0,008  | 0,010  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,008  |
| Cd                            | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,006  | 0,003  | ND     | ND     | ND     | 0,003  | ND     |
| Cr                            | ND     | 0,012  | ND     | 0,012  | 0,012  | 0,012  | ND     | ND     | 0,012  | 0,012  |
| Ac. acético                   | 1,80   | 5,50   | 2,37   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 3,8    | 2,9    | ND     | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | 3,0    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,7    | 0,5    | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 374    | 234    | 805    | 559    | 738    | 347    | 374    | 629    | 374    | 460    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.26 – Resultados das análises do percolado da Leira V17, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 7,1    | 7,1    | 7,9    | 7,6    | 7,4    | 7,8    | 7,5    | 7,7    | 7,5    | 7,3    |
| DQO                           | 900    | 610    | 190    | 520    | 440    | 470    | 430    | 480    | 715    | 610    |
| DBO <sub>5</sub>              | 7,5    | 27     | 37     | 10     | 15     | 22     | 47     | 15     | 82     | 17     |
| NTK                           | 11     | 19     | 10     | 7,8    | 3,5    | 3,6    | 4,2    | 11     | 25     | 5,3    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 3,4    | ND     | 0,6    | 4,6    | 2,1    | 2,7    | 2      | 2,5    | 15     | 4,2    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 173    | 271    | 515    | 467    | 358    | 503    | -      | 475    | 521    | 555    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 3,72   | 4,76   | 6,52   | 8,20   | 2,01   | 0,58   | -      | 2,74   | 7,18   | 12,04  |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 122    | 115    | 93     | 95     | 151    | 186    | -      | 201    | 190    | 79     |
| K                             | 14,758 | 13,886 | 12,757 | 17,345 | 18,662 | 15,698 | 11,087 | 8,489  | 15,003 | 11,087 |
| Ca                            | 13,781 | 13,365 | 13,381 | 14,731 | 14,715 | 14,831 | 15,048 | 14,131 | 13,981 | 13,715 |
| Mg                            | 13,153 | 12,313 | 12,362 | 16,816 | 18,000 | 17,416 | 18,683 | 16,833 | 15,750 | 16,613 |
| Mn                            | 0,044  | 0,040  | 0,050  | 0,042  | 0,040  | 0,042  | 0,044  | 0,038  | 0,036  | 0,040  |
| Fe                            | 4,131  | 6,615  | 5,034  | 3,738  | 3,812  | 3,775  | 3,591  | 4,143  | 4,327  | 3,885  |
| Cu                            | 0,020  | 0,015  | 0,020  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | 0,019  | 0,018  | 0,020  | 0,004  | 0,003  | 0,003  | 0,002  | 0,004  | 0,005  | 0,004  |
| Na                            | 5,240  | 5,240  | 4,375  | 1,287  | 1,280  | 1,302  | 0,947  | 0,958  | 0,849  | 0,826  |
| Pb                            | 0,009  | 0,013  | 0,009  | 0,010  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,010  | 0,010  | 0,010  |
| Ni                            | 0,018  | 0,017  | 0,018  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,008  | 0,008  |
| Cd                            | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,006  | 0,003  | ND     | ND     | ND     |
| Cr                            | 0,023  | ND     | ND     | 0,012  | 0,023  | 0,023  | ND     | ND     | ND     | 0,023  |
| Ac. acético                   | 1,21   | 2,09   | 2,49   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 2,9    | ND     | 0,1    | 6,3    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,5    | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 70     | 439    | 1.486  | 1.093  | 1.171  | 861    | 1.099  | 1.185  | 1.260  | 1.143  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.27 – Resultados das análises do percolado da Leira V18, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 6,9    | 7,0    | 7,7    | 7,7    | 7,7    | 7,0    | 7,8    | 8,1    | 7,5    | 6,2    |
| DQO                           | 216    | 230    | 118    | 208    | 144    | 160    | 170    | 176    | 400    | 336    |
| DBO <sub>5</sub>              | 2,4    | 16     | 22     | 3,6    | 25     | 20     | 5,5    | 7      | 12,6   | 30     |
| NTK                           | 2,2    | 1,4    | 0,6    | 3,9    | 4,4    | 3,4    | 3,4    | 3,4    | 5,6    | 6,7    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 2,2    | 1,1    | ND     | 2,8    | 1,4    | 1,7    | 1,4    | 1,7    | 0,8    | 30     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | ND     | ND     | -      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 564    | 384    | 486    | 469    | 418    | -      | -      | 644    | 413    | -      |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND     | ND     | ND     | ND     | 2,58   | -      | -      | ND     | 2,73   | -      |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 645    | 330    | 205    | 203    | 438    | -      | -      | 147    | 314    | -      |
| K                             | 15,051 | 14,685 | 14,322 | 10,246 | 11,343 | 10,026 | 12,979 | 13,429 | 12,222 | 11,417 |
| Ca                            | 12,983 | 12,981 | 12,725 | 13,098 | 12,981 | 12,965 | 13,048 | 13,131 | 13,065 | 13,031 |
| Mg                            | 12,527 | 12,066 | 12,099 | 16,833 | 17,866 | 17,416 | 17,700 | 17,616 | 16,750 | 16,866 |
| Mn                            | 0,040  | 0,036  | 0,020  | 0,056  | 0,050  | 0,056  | 0,054  | 0,050  | 0,036  | 0,050  |
| Fe                            | 5,260  | 6,389  | 5,711  | 3,572  | 3,554  | 3,517  | 3,315  | 2,541  | 2,946  | 2,854  |
| Cu                            | 0,015  | 0,010  | 0,015  | <0,005 | <0,005 | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | 0,020  | 0,020  | 0,016  | 0,003  | 0,003  | 0,001  | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Na                            | 5,240  | 5,240  | 4,798  | 1,006  | 1,029  | 1,044  | 0,901  | 0,819  | 0,827  | 0,950  |
| Pb                            | 0,028  | 0,023  | 0,023  | 0,005  | 0,005  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,014  | 0,005  |
| Ni                            | 0,017  | 0,018  | 0,016  | 0,008  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,008  | 0,007  | 0,007  |
| Cd                            | 0,003  | ND     | ND     | 0,006  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | ND     | 0,003  |
| Cr                            | 0,032  | ND     | ND     | 0,012  | 0,023  | 0,012  | 0,012  | ND     | ND     | ND     |
| Ac. acético                   | 1,09   | 1,57   | 2,27   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 7,50   | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | 0,43   | ND     | ND     | 0,7    | ND     | 2,5    | ND     | 0,3    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | 1,4    | ND     | 0,3    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 771    | 730    | 1.455  | 1.041  | 1.060  | 890    | 971    | 1.223  | 913    | 1.057  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.28 – Resultados das análises do percolado da Leira V19, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 6,8    | 6,8    | 7,4    | 7,4    | 7,4    | 8,0    | 7,3    | 7,7    | 7,2    | 7,1    |
| DQO                           | 664    | 770    | 368    | 576    | 470    | 520    | 520    | 570    | 728    | 760    |
| DBO <sub>5</sub>              | 6      | 94     | 37     | 19     | 32     | 30     | 53     | 47     | 30     | 140    |
| NTK                           | 17     | 37     | 30     | 15     | 16     | 4,1    | 12     | 20     | 7      | 19     |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 4,5    | 27     | 19     | 3,9    | 0,6    | 2,9    | 7,3    | 7,3    | 6,4    | 18     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 159    | 391    | 558    | 435    | 394    | 540    | 471    | 557    | 418    | 349    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | 2,96   | 8,40   | ND     | ND     | 2,0    | 5,34   | 2,54   | 11,22  | 1,53   | 8,79   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 113    | 104    | 66     | 297    | 501    | 153    | 114    | 72     | 181    | 63     |
| K                             | 14,322 | 13,849 | 13,156 | 14,783 | 14,600 | 15,074 | 13,795 | 12,332 | 18,186 | 19,614 |
| Ca                            | 14,065 | 13,465 | 14,065 | 13,715 | 14,631 | 13,631 | 11,398 | 11,215 | 12,048 | 12,865 |
| Mg                            | 12,445 | 11,984 | 11,934 | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| Mn                            | 0,030  | 0,038  | 0,026  | 0,112  | 0,040  | 0,036  | 0,060  | 0,080  | 0,040  | 0,036  |
| Fe                            | 4,628  | 4,447  | 4,357  | 4,143  | 3,904  | 3,775  | 2,560  | 3,112  | 3,775  | 3,738  |
| Cu                            | 0,005  | 0,005  | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | 0,020  | 0,014  | 0,013  | 0,004  | 0,001  | 0,001  | <0,001 | 0,001  | 0,001  | 0,003  |
| Na                            | 5,240  | 5,090  | 4,667  | 1,227  | 0,868  | 0,969  | 0,961  | 1,010  | 1,063  | 1,006  |
| Pb                            | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,014  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | 0,010  | 0,005  | 0,005  |
| Ni                            | 0,014  | 0,013  | 0,013  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,008  | 0,008  | 0,008  |
| Cd                            | 0,009  | 0,006  | 0,006  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Cr                            | ND     | ND     | ND     | 0,012  | 0,012  | 0,012  | 0,023  | 0,012  | 0,012  | 0,012  |
| Ac. acético                   | 0,95   | 1,36   | 1,82   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 2,8    | 0,1    | 0,1    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 1.527  | 1.386  | 1.993  | 1.669  | 1.982  | 1.553  | 1.628  | 1.791  | 1.408  | 1.485  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado



**Tabela A.29 – Resultados das análises do percolado da Leira V20, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 6,3    | 7,0    | 7,7    | 7,3    | 7,0    | 7,3    | 7,2    | 7,9    | 7,7    | 7,6    |
| DQO                           | 250    | 312    | 270    | 464    | 400    | 376    | 230    | 256    | 360    | 280    |
| DBO <sub>5</sub>              | 4,2    | 13     | 6      | 70     | 100    | 39     | 25     | 38     | 36     | 26     |
| NTK                           | 12     | 7,6    | 7      | 32     | 47     | 8      | 4,8    | 4,8    | 5      | 7,8    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 3,4    | 2      | 0,6    | 23     | 37     | 3,9    | 3,6    | 1,4    | 1,1    | 0,6    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | ND     | -      | -      | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 437    | -      | -      | 399    | 363    | 384    | 503    | 411    | 398    | 501    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | ND     | -      | -      | ND     | 5,25   | 3,80   | 1,59   | 1,15   | 1,28   | 4,95   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | 380    | -      | -      | 300    | 203    | 150    | 205    | 176    | 177    | 234    |
| K                             | 13,050 | 12,793 | 12,360 | 19,48  | 13,759 | 18,880 | 17,638 | 16,064 | 16,357 | 18,918 |
| Ca                            | 13,331 | 13,198 | 12,481 | 14,348 | 13,631 | 13,081 | 11,981 | 12,048 | 12,381 | 11,765 |
| Mg                            | 12,066 | 11,984 | 12,264 | 15,183 | 17,383 | 17,400 | 17,416 | 17,116 | 16,870 | 17,050 |
| Mn                            | 0,034  | 0,040  | 0,024  | 0,064  | 0,060  | 0,056  | 0,046  | 0,060  | 0,040  | 0,042  |
| Fe                            | 5,034  | 4,808  | 4,131  | 4,327  | 4,235  | 4,272  | 4,143  | 4,235  | 4,309  | 4,143  |
| Cu                            | 0,005  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | 0,020  | 0,018  | 0,018  | 0,001  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,004  | 0,005  | 0,005  |
| Na                            | 5,240  | 4,592  | 4,854  | 0,467  | 0,739  | 0,775  | 0,794  | 0,697  | 0,710  | 0,763  |
| Pb                            | 0,013  | 0,009  | 0,004  | 0,010  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | 0,005  |
| Ni                            | 0,020  | 0,018  | 0,018  | 0,007  | 0,007  | ND     | ND     | ND     | 0,007  | ND     |
| Cd                            | 0,006  | 0,006  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,003  | 0,006  | 0,006  | 0,003  | 0,003  |
| Cr                            | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,012  | 0,012  | ND     | ND     | ND     |
| Ac. acético                   | 1,28   | 1,47   | 2,00   | ND     | ND     | ND     | ND     | 4,8    | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | ND     | 2,6    | 1,5    | 1,6    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,3    | ND     | 0,2    | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,3    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 1.465  | 1.305  | 2.030  | 1.669  | 2.029  | 1.540  | 1.774  | 2.065  | 1.317  | 1.655  |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.30 – Resultados das análises do percolado da Leira V21, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-------------------------------|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                               | 1      | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| pH                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| DQO                           | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| NTK                           | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| K                             | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ca                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Mg                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Mn                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Fe                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Cu                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Zn                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Na                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Pb                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ni                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Cd                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Cr                            | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. acético                   | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. propiônico                | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. butírico                  | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-butírico              | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. valérico                  | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Ac. iso-valérico              | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |
| Volume coletado (ml)          | VI     | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.31 – Resultados das análises do percolado da Leira V22, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | VI     | VI     | 7,9    | 7,6    | 8,0    | 7,8    | 7,9    | 8,1    | 8,0    | 7,9    |
| DQO                           | VI     | VI     | 78     | 312    | 164    | 128    | 112    | 80     | 400    | 312    |
| DBO <sub>5</sub>              | VI     | VI     | 16     | 45     | 21     | VI     | 10     | 40     | VI     | VI     |
| NTK                           | VI     | 2,8    | 1,2    | 25     | 2,5    | 2,2    | 1,8    | 7,3    | 5      | 0,6    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | ND     | 0,6    | 12     | 1,1    | 0,8    | 0,8    | 0,7    | 0,6    | ND     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | 398    | 449    | 382    | 418    | -      | -      | 495    | 403    | 347    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | ND     | ND     | ND     | 8,03   | -      | -      | ND     | 2,13   | ND     |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | 230    | 314    | 322    | 255    | -      | -      | 253    | 185    | 155    |
| K                             | VI     | 13,922 | 13,157 | 1,976  | 7,172  | 2,525  | 1,793  | 5,855  | 0,585  | 0,475  |
| Ca                            | VI     | 12,665 | 13,898 | 13,081 | 13,215 | 13,048 | 13,631 | 13,715 | 13,881 | 13,965 |
| Mg                            | VI     | 11,572 | 10,732 | 18,866 | 18,950 | 19,033 | 19,250 | 18,866 | 17,583 | 17,516 |
| Mn                            | VI     | 0,020  | 0,016  | 0,040  | 0,042  | 0,036  | 0,030  | 0,036  | 0,040  | 0,038  |
| Fe                            | VI     | 5,711  | 5,147  | 3,738  | 2,486  | 2,486  | 3,591  | 3,775  | 3,867  | 3,885  |
| Cu                            | VI     | 0,025  | 0,015  | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | VI     | 0,020  | 0,016  | 0,005  | 0,004  | 0,004  | 0,005  | 0,003  | 0,003  | 0,003  |
| Na                            | VI     | 5,240  | 5,240  | 0,553  | 0,830  | 0,763  | 0,781  | 0,774  | 0,587  | 0,624  |
| Pb                            | VI     | 0,013  | 0,013  | 0,010  | 0,010  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | 0,010  | 0,010  |
| Ni                            | VI     | 0,011  | 0,010  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Cd                            | VI     | 0,003  | ND     | 0,003  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Cr                            | VI     | ND     | ND     | 0,012  | 0,012  | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,012  |
| Ac. acético                   | VI     | 0,58   | 2,40   | ND     | ND     | ND     | ND     | 6,0    | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 2,6    | 1,7    | 0,1    | ND     |
| Ac. butírico                  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 1,4    | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 1,2    | 1,1    | ND     | ND     |
| Ac. valérico                  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,1    | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | VI     | 10     | 689    | 493    | 762    | 366    | 339    | 604    | 384    | 200    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.32 – Resultados das análises do percolado da Leira V23, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 7,1    | 7,5    | 7,6    | 7,9    | 7,9    | 8,1    | 7,8    | 8,4    | 7,8    | 6,5    |
| DQO                           | 176    | 232    | 98     | 160    | 120    | 96     | 120    | 80     | 200    | 120    |
| DBO <sub>5</sub>              | 5,5    | 7      | 19     | 35     | 25     | 23     | 17     | 16     | 60     | 17     |
| NTK                           | VI     | 0,8    | 1,0    | 3,1    | 2,0    | 3,0    | 2,2    | 28     | 1,4    | 1,7    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | VI     | ND     | 0,8    | 2,8    | 0,8    | 1,8    | 1,1    | 0,6    | 0,5    | 0,8    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | VI     | 544    | 552    | 434    | 400    | 428    | 413    | 309    | 335    | 499    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 1,13   | ND     | 5,23   | 7,13   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | VI     | 420    | 436    | 325    | 403    | 289    | 128    | 153    | 214    | 177    |
| K                             | VI     | 13,959 | 16,516 | 4,830  | 4,755  | 1,755  | 2,597  | 2,670  | 4,208  | 3,659  |
| Ca                            | VI     | 12,048 | 12,815 | 15,381 | 15,548 | 15,215 | 14,548 | 16,215 | 16,381 | 16,015 |
| Mg                            | VI     | 12,066 | 11,572 | 18,500 | 18,950 | 18,860 | 18,833 | 18,766 | 19,083 | 19,250 |
| Mn                            | VI     | 0,044  | 0,020  | 0,046  | 0,040  | 0,036  | 0,040  | 0,042  | 0,046  | 0,036  |
| Fe                            | VI     | 6,118  | 5,982  | 4,383  | 4,419  | 4,511  | 4,474  | 4,530  | 4,511  | 4,327  |
| Cu                            | VI     | 0,020  | 0,020  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Zn                            | VI     | 0,020  | 0,016  | 0,004  | 0,003  | 0,004  | 0,003  | 0,004  | 0,003  | 0,001  |
| Na                            | VI     | 5,240  | 4,671  | 0,575  | 0,594  | 0,635  | 0,639  | 0,766  | 0,789  | 0,770  |
| Pb                            | VI     | 0,023  | 0,018  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | 0,010  | 0,010  | 0,005  | 0,010  |
| Ni                            | VI     | 0,017  | 0,017  | ND     | 0,007  | 0,007  | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Cd                            | VI     | ND     | ND     | 0,003  | 0,003  | ND     | ND     | ND     | 0,003  | ND     |
| Cr                            | VI     | ND     | ND     | 0,023  | 0,012  | ND     | ND     | ND     | 0,012  | ND     |
| Ac. acético                   | VI     | 1,42   | 2,08   | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 4,7    | 0,1    | ND     | ND     |
| Ac. butírico                  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,4    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,2    | ND     | 0,3    | ND     |
| Ac. valérico                  | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,3    | ND     |
| Ac. iso-valérico              | VI     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 62     | 690    | 1.107  | 1.076  | 1.325  | 845    | 1.005  | 1.206  | 729    | 682    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.33 – Resultados das análises do percolado da Leira V24, Fase 3 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| pH                            | 7,3    | 7,7    | 7,8    | 7,9    | 7,9    | 8,1    | 8,0    | 8,5    | 7,7    | 6,8    |
| DQO                           | 264    | 190    | 86     | 160    | 108    | 128    | 112    | 80     | 224    | 120    |
| DBO <sub>5</sub>              | 6      | 29     | 13     | 11     | 38     | 31     | 13     | 40     | 40     | 2      |
| NTK                           | 9,0    | 1,0    | 1,2    | 4,8    | 1,5    | 2,2    | 1,2    | 6,2    | 2,5    | 2,5    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 2,2    | ND     | 0,6    | 3,1    | 0,6    | 1,3    | 1,0    | 1,0    | 1,7    | 0,6    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | -      | -      | -      | ND     | ND     | ND     | -      | ND     | ND     | ND     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | -      | -      | -      | 394    | 369    | 208    | -      | 503    | 594    | 404    |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | -      | -      | -      | ND     | 7,14   | ND     | -      | 1,58   | 1,74   | 1,53   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | -      | -      | -      | 298    | 500    | 142    | -      | 184    | 428    | 128    |
| K                             | 14,142 | 13,959 | 14,032 | 5,451  | 3,513  | 0,399  | 0,256  | 0,765  | 1,352  | 1,535  |
| Ca                            | 14,465 | 13,665 | 12,865 | 17,915 | 17,381 | 16,215 | 16,215 | 16,381 | 16,398 | 17,965 |
| Mg                            | 12,231 | 12,478 | 12,035 | 18,783 | 18,900 | 19,033 | 17,200 | 17,216 | 18,516 | 18,483 |
| Mn                            | 0,040  | 0,038  | 0,022  | 0,038  | 0,040  | 0,036  | 0,030  | 0,026  | 0,038  | 0,044  |
| Fe                            | 6,163  | 6,118  | 6,389  | 4,327  | 3,959  | 3,922  | 4,050  | 4,511  | 4,474  | 4,382  |
| Cu                            | 0,025  | 0,031  | 0,036  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,005  |
| Zn                            | 0,019  | 0,018  | 0,018  | 0,004  | 0,003  | 0,002  | 0,001  | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Na                            | 5,240  | 5,240  | 5,240  | 1,055  | 0,838  | 1,066  | 1,033  | 1,029  | 1,044  | 0,954  |
| Pb                            | 0,028  | 0,023  | 0,018  | 0,005  | 0,005  | 0,005  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | 0,005  |
| Ni                            | 0,008  | 0,008  | 0,010  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Cd                            | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,003  | 0,003  | ND     | ND     |
| Cr                            | ND     | ND     | ND     | 0,012  | 0,012  | 0,012  | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. acético                   | 1,65   | 3,14   | 4,29   | ND     | ND     | ND     | ND     | 5,2    | ND     | ND     |
| Ac. propiônico                | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 2,4    | 0,5    | 1,0    | 1,4    | ND     |
| Ac. butírico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,4    | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-butírico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | 0,2    | ND     | 0,2    | ND     |
| Ac. valérico                  | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Ac. iso-valérico              | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     | ND     |
| Volume coletado (ml)          | 418    | 1.078  | 1.530  | 1.552  | 1.928  | 1.506  | 1.547  | 1.728  | 1.119  | 727    |

Obs.: Início da primeira semana em 03/06/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.34 - Caracterização do lixiviado bruto afluyente, ao longo da realização da Fase 4 (mg/l, exceto pH)**

| Parâmetro                     | Semana |        |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                               | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| pH                            | 7,6    | 7,7    | 7,3    | 7,7    | 7,2    | 7,8    | 7,8    | 7,5    |
| DQO                           | 930    | 1170   | 1140   | 780    | 610    | 680    | 850    | 720    |
| DBO <sub>5</sub>              | 83     | 56     | 110    | 220    | 230    | 70     | 340    | 66     |
| NTK                           | 588    | 498    | 602    | 532    | 48     | 480    | 588    | 602    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 532    | 480    | 585    | 520    | 42     | 465    | 540    | 560    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 1,40   | -      | 1,47   | -      | -      | 0,96   | 3,33   | -      |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -      |
| K                             | 10,813 | 12,242 | 9,824  | 10,264 | 10,374 | 9,956  | 10,132 | 10,209 |
| Ca                            | 17,532 | 18,182 | 16,982 | 16,765 | 18,148 | 19,382 | 19,348 | 18,448 |
| Mg                            | 16,833 | 16,617 | 16,567 | 17,017 | 15,700 | 16,533 | 15,200 | 15,383 |
| Mn                            | 0,070  | 0,056  | 0,052  | 0,060  | 0,054  | 0,052  | 0,056  | 0,052  |
| Fe                            | 5,985  | 5,433  | 5,985  | 4,972  | 5,065  | 4,512  | 4,972  | 5,286  |
| Cu                            | 0,015  | 0,010  | 0,005  | 0,005  | 0,015  | 0,010  | 0,021  | 0,015  |
| Zn                            | 0,021  | 0,025  | 0,018  | 0,023  | 0,016  | 0,017  | 0,016  | 0,021  |
| Na                            | 3,075  | 2,903  | 3,097  | 3,200  | 3,191  | 3,067  | 3,124  | 3,322  |
| Pb                            | 0,014  | 0,014  | 0,023  | 0,023  | 0,023  | 0,019  | 0,023  | 0,019  |
| Ni                            | 0,018  | 0,013  | 0,010  | 0,012  | 0,009  | 0,010  | 0,010  | 0,010  |
| Cd                            | 0,006  | 0,004  | 0,004  | 0,006  | 0,009  | 0,004  | 0,004  | 0,006  |
| Cr                            | 0,080  | 0,045  | 0,092  | 0,115  | 0,068  | 0,057  | 0,080  | 0,057  |
| Ac. acético                   | -      | 1,12   | 0,54   | 2,59   | 1,20   | -      | -      | -      |
| Ac. propiônico                | -      | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | -      |
| Ac. butírico                  | -      | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | -      |
| Ac. iso-butírico              | -      | 4,69   | 2,33   | ND     | 1,87   | -      | -      | -      |
| Ac. valérico                  | -      | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | -      |
| Ac. iso-valérico              | -      | ND     | ND     | ND     | ND     | -      | -      | -      |

Obs.: Início da primeira semana em 05/09/97

ND: Não detectado

**Tabela A.35** - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 4**, ao início do experimento

| Parâmetro                               | Leira |        |      |      |
|---|-------|--------|------|------|
|   | V21   | V22    | V23  | V24  |
| pH                                      | 6,8   | 6,6    | 6,4  | 6,3  |
| C org.(%)                               | 5,9   | 7,3    | 6,7  | 4,8  |
| NTK (%)                                 | 0,45  | 0,46   | 0,47 | 0,47 |
| P (%)                                   | 0,16  | < 0,01 | 0,18 | 0,16 |
| K (%)                                   | 0,29  | 0,28   | 0,34 | 0,30 |
| Ca (%)                                  | 1,00  | 0,86   | 0,60 | 0,52 |
| Mg (%)                                  | 0,04  | 0,10   | 0,08 | 0,10 |
| Cu (mg/kg)                              | 85    | 96     | 107  | 95   |
| Zn (mg/kg)                              | 274   | 334    | 357  | 253  |
| Fe (%)                                  | 6,3   | 6,4    | 6,8  | 7,9  |
| Mn (mg/kg)                              | 464   | 533    | 504  | 440  |
| S (%)                                   | 0,10  | 0,10   | 0,10 | 0,10 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg/kg) | 34    | 31     | 38   | 27   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)    | 305   | 342    | 399  | 399  |
| Pb (mg/kg)                              | 52    | 68     | 76   | 76   |
| Cd (mg/kg)                              | 0,83  | 1,2    | 1,7  | 1,7  |
| Ni (mg/kg)                              | 37    | 46     | 44   | 46   |
| Cr (mg/kg)                              | 71    | 90     | 95   | 94   |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.36** - Caracterização do substrato de cada leira de vermicompostagem da **Fase 4**, aos 60 dias do experimento

| Parâmetro                               | Leira |      |      |      |
|---|-------|------|------|------|
|   | V21   | V22  | V23  | V24  |
| pH                                      | 6,4   | 6,2  | 6,2  | 5,9  |
| C org.(%)                               | 7,0   | 7,0  | 7,2  | 6,5  |
| NTK (%)                                 | 0,41  | 0,28 | 0,54 | 0,46 |
| P (%)                                   | 0,18  | 0,21 | 0,20 | 0,16 |
| K (%)                                   | 0,46  | 0,46 | 0,30 | 0,32 |
| Ca (%)                                  | 0,82  | 0,36 | 1,20 | 0,67 |
| Mg (%)                                  | 0,26  | 0,26 | 0,12 | 0,20 |
| Cu (mg/kg)                              | 88    | 89   | 97   | 80   |
| Zn (mg/kg)                              | 277   | 369  | 338  | 282  |
| Fe (%)                                  | 5,9   | 5,6  | 6,2  | 5,8  |
| Mn (mg/kg)                              | 704   | 724  | 755  | 624  |
| S (%)                                   | 0,13  | 0,12 | 0,11 | 0,10 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup><br>(mg/kg) | 67    | 92   | 102  | 192  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/kg)    | 338   | 438  | 474  | 409  |
| Pb (mg/kg)                              | 91    | 93   | 114  | 89   |
| Cd (mg/kg)                              | 1,3   | 2,4  | 1,9  | 2,2  |
| Ni (mg/kg)                              | 43    | 44   | 52   | 42   |
| Cr (mg/kg)                              | 88    | 92   | 100  | 116  |

Obs.: 1 % igual a 10.000 mg/kg

**Tabela A.37 – Resultado das análises do percolado das Leiras V21 e V22, Fase 4**

| Parâmetro<br>(mg/l, exceto pH) | Semana (Leira V21) |    |    |    |    |    |    |    | Semana (Leira V22) |    |    |         |         |         |         |         |
|--------------------------------|--------------------|----|----|----|----|----|----|----|--------------------|----|----|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                | 1                  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 1                  | 2  | 3  | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| pH                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | 7,9     | 7,6     | 7,4     |
| DQO                            | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 110     | 80      | 128     | 80      | 130     |
| DBO <sub>5</sub>               | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 6       | -       | 25      | 2       | 24      |
| NTK                            | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 11      | 0,80    | 1,00    | 0,60    | 2,20    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 7,0     | 0,5     | 0,8     | ND      | 1,4     |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | 187     | -       | -       | -       |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>  | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>  | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | 64      | -       | -       | -       |
| K                              | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 6,670   | 7,011   | 6,648   | 6,747   | 6,528   |
| Ca                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 13,915  | 13,198  | 13,348  | 13,315  | 13,415  |
| Mg                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 13,867  | 12,367  | 14,533  | 14,200  | 14,533  |
| Mn                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 0,030   | 0,032   | 0,026   | 0,020   | 0,030   |
| Fe                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 3,039   | 3,591   | 3,223   | 3,131   | 3,093   |
| Cu                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      |
| Zn                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 |
| Na                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 0,924   | 0,831   | 0,876   | 0,891   | 0,902   |
| Pb                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 0,009   | 0,009   | 0,014   | 0,014   | 0,014   |
| Ni                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | 0,008   | 0,008   | 0,008   | ND      | ND      |
| Cd                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      |
| Cr                             | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      |
| Ac. acético                    | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. propiônico                 | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. butírico                   | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. iso-butírico               | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. valérico                   | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. iso-valérico               | VI                 | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI | VI                 | VI | VI | -       | -       | -       | -       | -       |
| Volume coletado (ml)           | 0                  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0                  | 0  | 0  | 492     | 170     | 558     | 229     | 545     |

Obs.: Início da primeira semana em 05/09/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.38 – Resultado das análises do percolado das Leiras V23 e V24, Fase 4**

| Parâmetro<br>(mg/l, exceto pH) | Semana (Leira V23) |        |         |         |         |         |         |         | Semana (Leira V24) |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------------|--------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                | 1                  | 2      | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 1                  | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
| pH                             | 7,8                | 7,8    | 7,8     | 7,4     | -       | 7,6     | 7,4     | 7,3     | 7,9                | 7,8     | 7,9     | 7,2     | 7,4     | 7,5     | 7,4     | 7,3     |
| DQO                            | 128                | 144    | 180     | 96      | 92      | 176     | 104     | 160     | 168                | 192     | 130     | 140     | 40      | 216     | 180     | 190     |
| DBO <sub>5</sub>               | 12                 | 12     | 2       | 5       | -       | 37      | 20      | 20      | 2                  | 2       | 10      | 4       | 6       | 20      | 6       | 5       |
| NTK                            | 1,20               | 0,60   | 0,80    | 8,00    | 1,10    | 1,10    | 0,50    | 2,00    | 1,50               | 1,70    | 0,50    | 9,20    | 0,60    | 1,20    | 0,50    | 1,70    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>   | 0,80               | ND     | 0,50    | 5,00    | 0,90    | 0,90    | ND      | 0,80    | 1,20               | ND      | ND      | 7,60    | 0,50    | 1,00    | ND      | 1,10    |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>   | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   | 130                | 102    | 98      | 141     | 156     | -       | 127     | -       | 151                | 137     | 162     | 183     | -       | -       | 130     | -       |
| PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>  | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>  | 36                 | 40     | 29      | 37      | 35      | -       | 22      | -       | 34                 | 27      | 28      | 33      | -       | -       | 18      | -       |
| K                              | 7,736              | 5,681  | 5,769   | 5,637   | 5,670   | 5,198   | 4,626   | 4,484   | 6,659              | 6,506   | 6,473   | 6,528   | 6,659   | 6,473   | 5,649   | 5,868   |
| Ca                             | 12,532             | 12,298 | 11,582  | 12,348  | 12,398  | 11,615  | 11,782  | 12,515  | 11,998             | 12,148  | 12,165  | 12,748  | 12,782  | 11,882  | 12,182  | 11,965  |
| Mg                             | 16,200             | 15,767 | 15,733  | 15,867  | 16,233  | -       | 15,333  | 15,700  | 15,067             | 15,117  | 15,117  | 15,083  | 12,500  | 12,600  | 15,200  | 14,067  |
| Mn                             | 0,036              | 0,032  | 0,030   | 0,026   | 0,020   | 0,022   | 0,026   | 0,024   | 0,030              | 0,034   | 0,036   | 0,032   | 0,026   | 0,024   | 0,016   | 0,020   |
| Fe                             | 3,333              | 3,278  | 3,425   | 3,407   | 3,223   | 3,241   | 2,744   | 2,703   | 3,315              | 2,670   | 3,996   | 3,131   | 2,910   | 3,186   | 3,131   | 2,855   |
| Cu                             | ND                 | ND     | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND                 | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      |
| Zn                             | 0,006              | 0,003  | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005            | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 | < 0,005 |
| Na                             | 1,209              | 1,254  | 1,299   | 1,588   | 1,067   | 0,853   | 1,044   | 0,909   | 0,737              | 0,456   | 0,801   | 0,789   | 0,894   | 0,857   | 0,781   | 0,924   |
| Pb                             | 0,009              | 0,009  | 0,009   | 0,009   | 0,014   | 0,014   | 0,014   | 0,014   | 0,014              | 0,009   | 0,009   | 0,014   | 0,014   | 0,009   | 0,009   | 0,009   |
| Ni                             | ND                 | ND     | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Cd                             | ND                 | ND     | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND                 | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      |
| Cr                             | ND                 | ND     | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | ND      | 0,011              | 0,022   | ND      | ND      | ND      | 0,011   | ND      | ND      |
| Ac. acético                    | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. propiônico                 | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. butírico                   | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. iso-butírico               | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. valérico                   | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Ac. iso-valérico               | -                  | -      | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -                  | -       | -       | -       | -       | -       | -       | -       |
| Volume coletado (ml)           | 417                | 418    | 596     | 694     | 647     | 1.303   | 649     | 1.020   | 1.078              | 1.297   | 1.240   | 1.408   | 1.325   | 1.783   | 1.122   | 1.543   |

Obs.: Início da primeira semana em 05/09/97

VI: Volume insuficiente

ND: Não detectado

**Tabela A.39 – Dinâmica da população de minhocas durante a Fase 1**

| Leira | Minhocas no inóculo |                  | Minhocas no encerramento da Fase 1 |                  |        |       | Nº de casulos |
|-------|---------------------|------------------|------------------------------------|------------------|--------|-------|---------------|
|       | Massa (g)           | Nº de indivíduos | Massa (g)                          | Nº de indivíduos |        |       |               |
|       |                     |                  |                                    | Adultos          | Jovens | Total |               |
| V1    | 92,22               | 197              | 45,15                              | 211              | 28     | 239   | 66            |
| V2    | 92,22               | 174              | 45,37                              | 243              | 181    | 424   | 81            |
| V3    | 111,11              | 200              | 45,87                              | 195              | 54     | 249   | 66            |
| V4    | 92,22               | 193              | 48,91                              | 198              | 58     | 256   | 122           |
| V5    | 92,22               | 194              | 41,11                              | 161              | 121    | 282   | 0             |
| V6    | 111,11              | 199              | 33,94                              | 187              | 25     | 212   | 54            |
| V7    | 92,22               | 207              | 53,87                              | 227              | 32     | 259   | 52            |
| V8    | 92,22               | 198              | 44,42                              | 212              | 81     | 293   | 22            |
| V9    | 111,11              | 202              | 47,70                              | 186              | 27     | 213   | 41            |
| V10   | 92,22               | 212              | 45,06                              | 208              | 21     | 229   | 54            |
| V11   | 92,22               | 212              | 50,87                              | 228              | 63     | 291   | 14            |
| V12   | 111,11              | 183              | 39,73                              | 172              | 39     | 211   | 19            |

**Tabela A.40 – Dinâmica da população de minhocas durante a Fase 3**

| Leira | Minhocas no inóculo |                  | Minhocas no encerramento da Fase 1 |                  |        |       | Nº de casulos |
|-------|---------------------|------------------|------------------------------------|------------------|--------|-------|---------------|
|       | Massa (g)           | Nº de indivíduos | Massa (g)                          | Nº de indivíduos |        |       |               |
|       |                     |                  |                                    | Adultos          | Jovens | Total |               |
| V13   | 140                 | 170              | 90,84                              | 170              | 38     | 208   | 74            |
| V14   | 215                 | 230              | 18,68                              | 34               | 0      | 34    | 0             |
| V15   | 140                 | 158              | 82,21                              | 158              | 22     | 180   | 43            |
| V16   | 215                 | 222              | 38,70                              | 70               | 0      | 70    | 2             |
| V17   | 140                 | 136              | 78,39                              | 121              | 8      | 129   | 4             |
| V18   | 215                 | 235              | 36,70                              | 76               | 0      | 76    | 0             |
| V19   | 140                 | 169              | 79,46                              | 125              | 50     | 175   | 150           |
| V20   | 215                 | 244              | 20,63                              | 60               | 0      | 60    | 8             |
| V21   | 215                 | 233              | 15,14                              | 38               | 4      | 42    | 2             |
| V22   | 215                 | 237              | 37,24                              | 102              | 0      | 102   | 12            |
| V23   | 215                 | 243              | 64,91                              | 136              | 12     | 148   | 73            |
| V24   | 215                 | 208              | 44,58                              | 79               | 6      | 85    | 6             |

**Tabela A.41 – Retenção de líquido e umidade nas leiras, Fases 1 e 3**

| Fase 1 |                          |                   |             | Fase 3 |                          |                   |             |
|--------|--------------------------|-------------------|-------------|--------|--------------------------|-------------------|-------------|
| Leira  | Taxa de aplicação (ml/d) | Volume Retido (%) | Umidade (%) | Leira  | Taxa de Aplicação (ml/d) | Volume Retido (%) | Umidade (%) |
| V1     | 100                      | 11,6              | 46,7        | V13    | 150                      | 98,1              | 48,8        |
| V2     | 100                      | 25,8              | 47,4        | V14    | 150                      | 93,3              | 28,4        |
| V3     | 100                      | 22,0              | 40,0        | V15    | 230                      | 64,2              | 48,7        |
| V4     | 155                      | 10,4              | 47,1        | V16    | 230                      | 64,5              | 28,7        |
| V5     | 155                      | 12,2              | 47,5        | V17    | 330                      | 50,5              | 47,6        |
| V6     | 155                      | 10,9              | 37,0        | V18    | 330                      | 48,9              | 28,6        |
| V7     | 225                      | 8,3               | 48,8        | V19    | 440                      | 37,8              | 49,7        |
| V8     | 225                      | 8,8               | 48,6        | V20    | 440                      | 36,2              | 28,2        |
| V9     | 225                      | 12,1              | 44,8        | V21    | 150                      | 100,0             | 27,3        |
| V10    | 300                      | 9,7               | 45,5        | V22    | 230                      | 72,1              | 28,5        |
| V11    | 300                      | 10,6              | 47,0        | V23    | 330                      | 55,9              | 29,4        |
| V12    | 300                      | 14,5              | 37,9        | V24    | 440                      | 49,1              | 28,9        |

Obs.: Volume retido corresponde a percentagem do líquido aplicado que não percolou pela base da leira

**Tabela A.42 – Retenção de líquido e umidade nas leiras, Fases 2 e 4**

| Fase 2 |                          |                   |             | Fase 4 |                          |                   |             |
|--------|--------------------------|-------------------|-------------|--------|--------------------------|-------------------|-------------|
| Leira  | Taxa de aplicação (ml/d) | Volume Retido (%) | Umidade (%) | Leira  | Taxa de Aplicação (ml/d) | Volume Retido (%) | Umidade (%) |
| V2     | 100                      | 31,9              | 43,7        | V21    | 150                      | 100,0             | 29,6        |
| V5     | 155                      | 19,2              | 48,0        | V22    | 230                      | 81,9              | 31,4        |
| V8     | 225                      | 15,8              | 41,3        | V23    | 330                      | 63,7              | 32,2        |
| V11    | 300                      | 20,0              | 43,0        | V24    | 440                      | 48,9              | 28,7        |

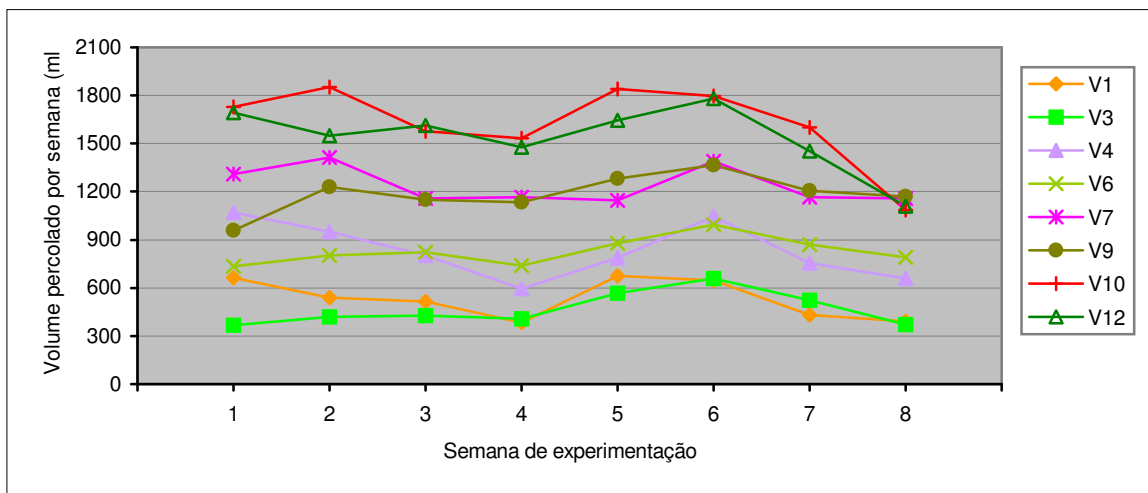
Obs.: Volume retido corresponde a percentagem do líquido aplicado que não percolou pela base da leira

**A n e x o B**  
**Gráficos dos volumes percolados e das concentrações no efluente**

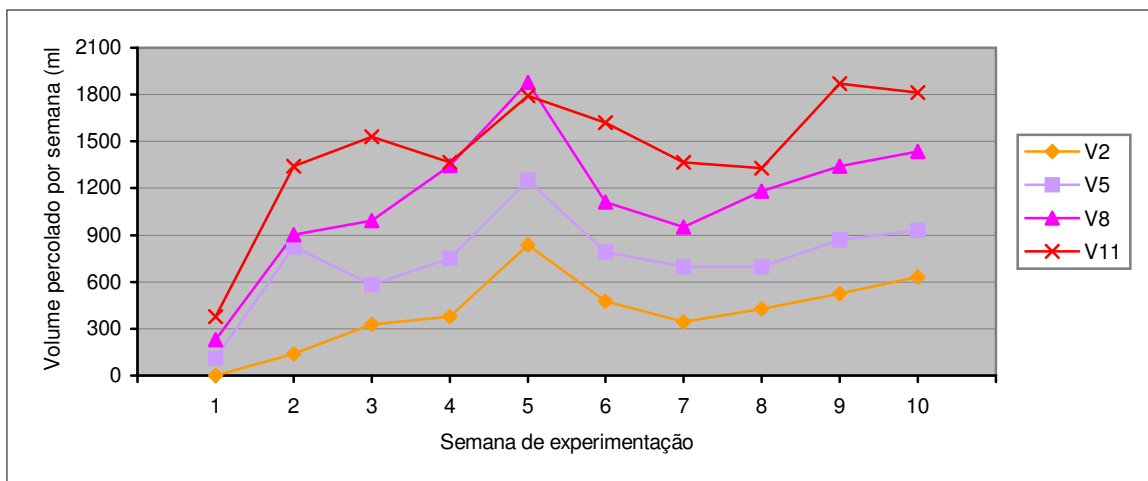
Leiras com composto como substrato: cores laranja-avermelhadas

Leiras com mistura como substrato: cores amarelo-esverdeadas

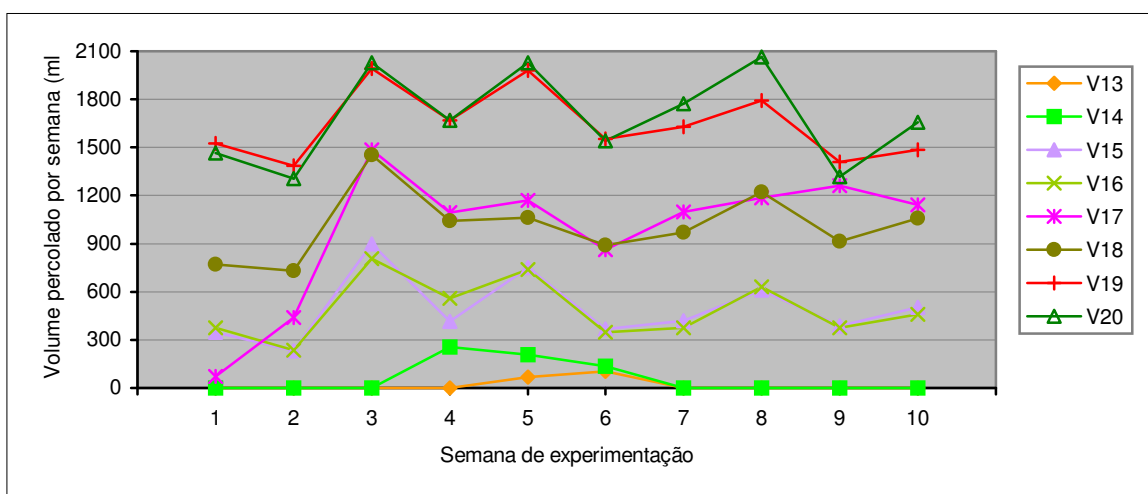




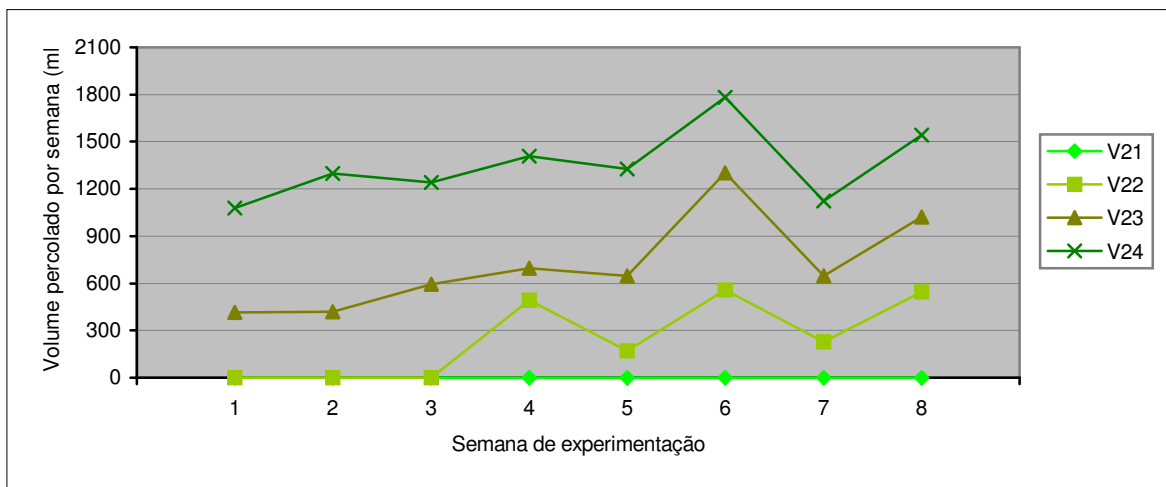
**Figura B.1** – Volume percolado por semana nas leiras da Fase 1



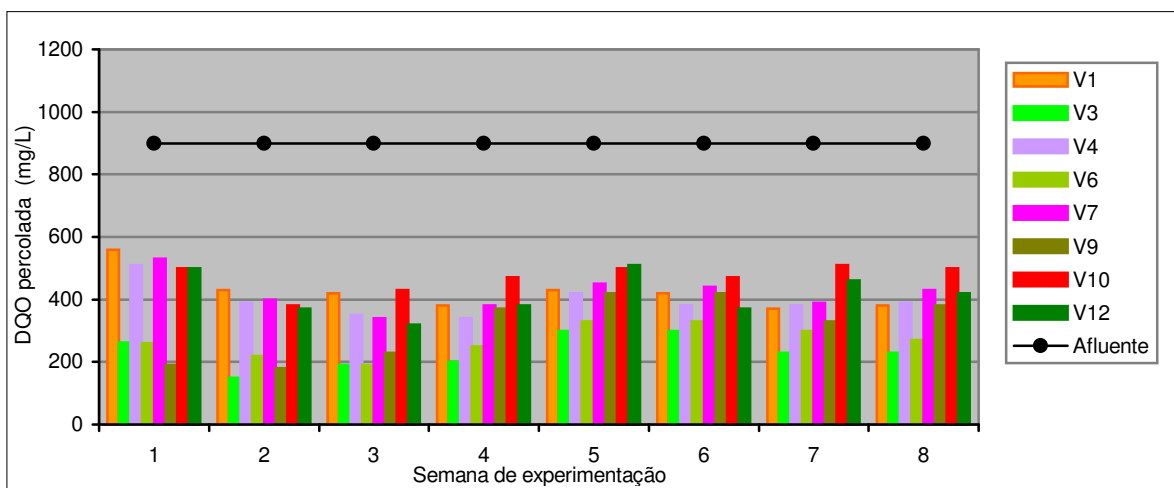
**Figura B.2** – Volume percolado por semana nas leiras da Fase 2



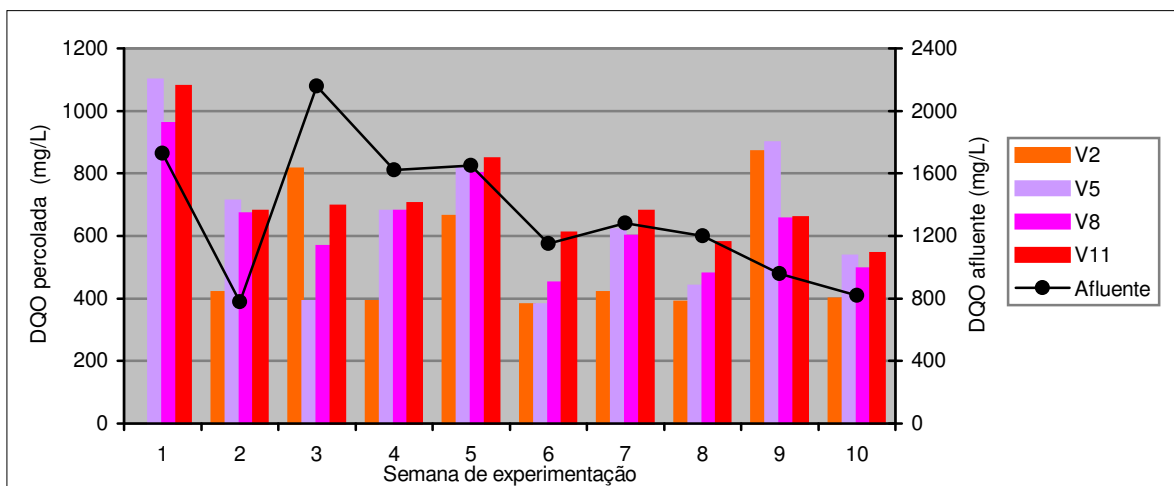
**Figura B.3** – Volume percolado por semana nas leiras da Fase 3



**Figura B.4** – Volume percolado por semana nas leiras da Fase 4



**Figura B.5** – Resultados de concentração de DQO nas leiras da Fase 1



**Figura B.6** – Resultados de concentração de DQO nas leiras da Fase 2

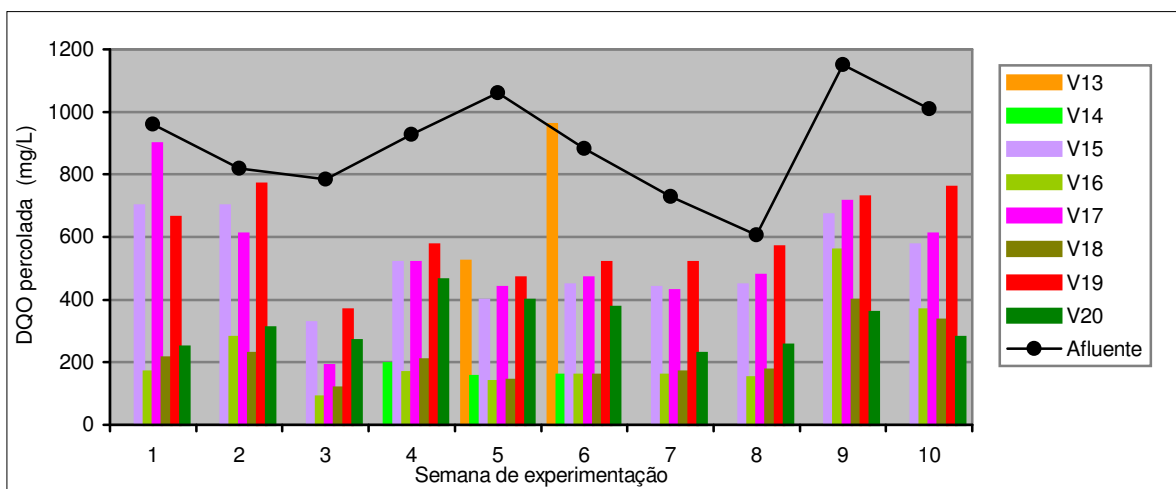


Figura B.7 – Resultados de concentração de DQO nas leiras da Fase 3

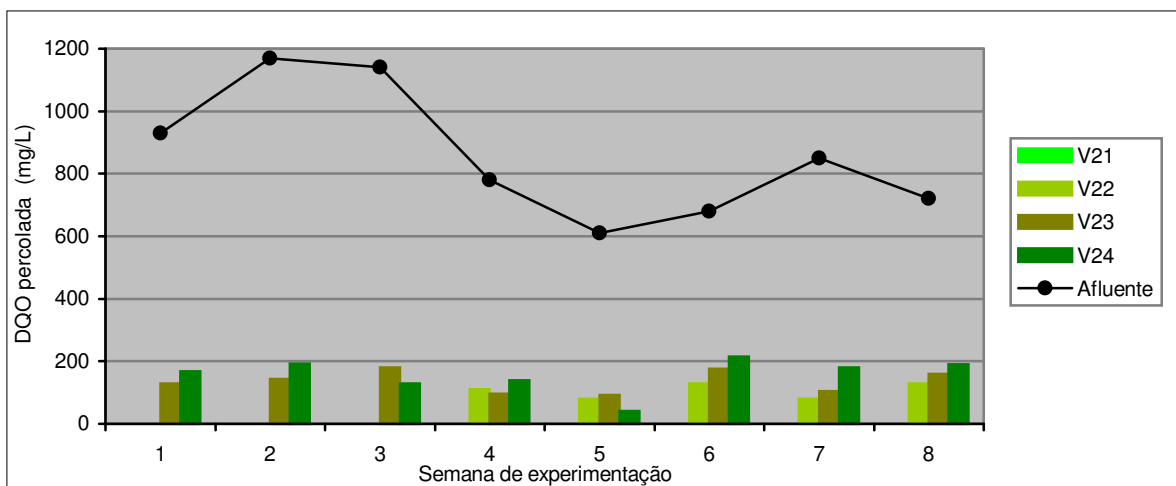


Figura B.8 – Resultados de concentração de DQO nas leiras da Fase 4

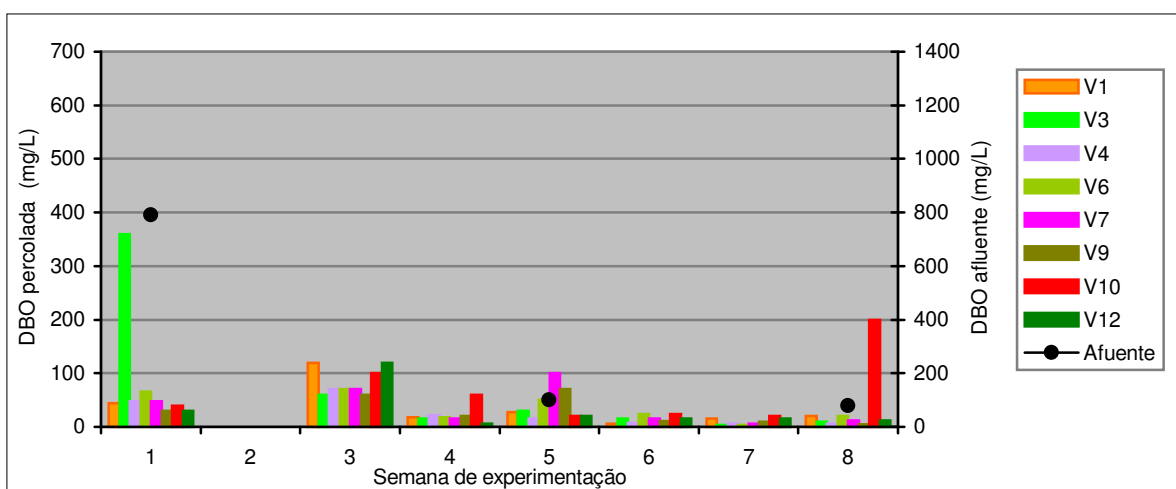
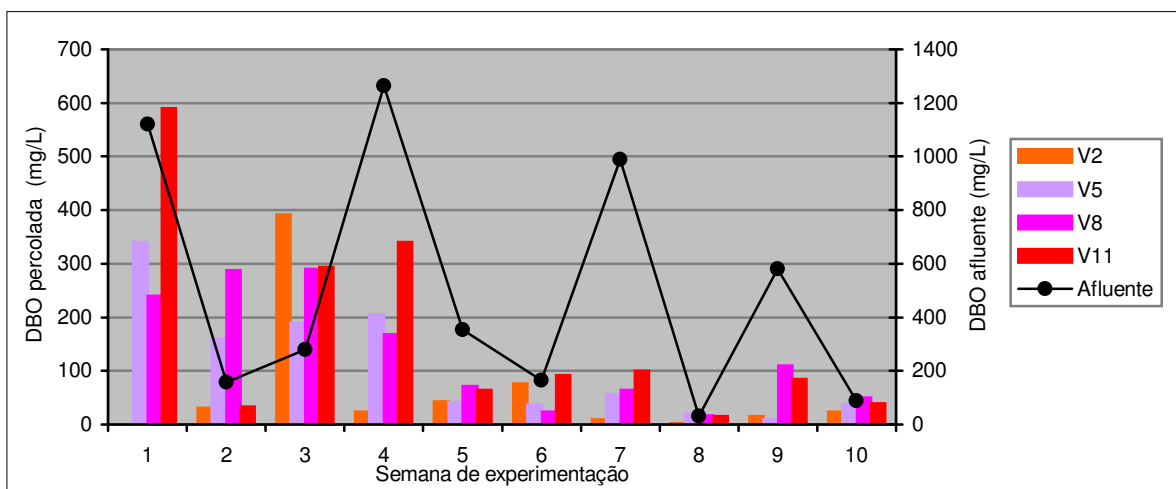
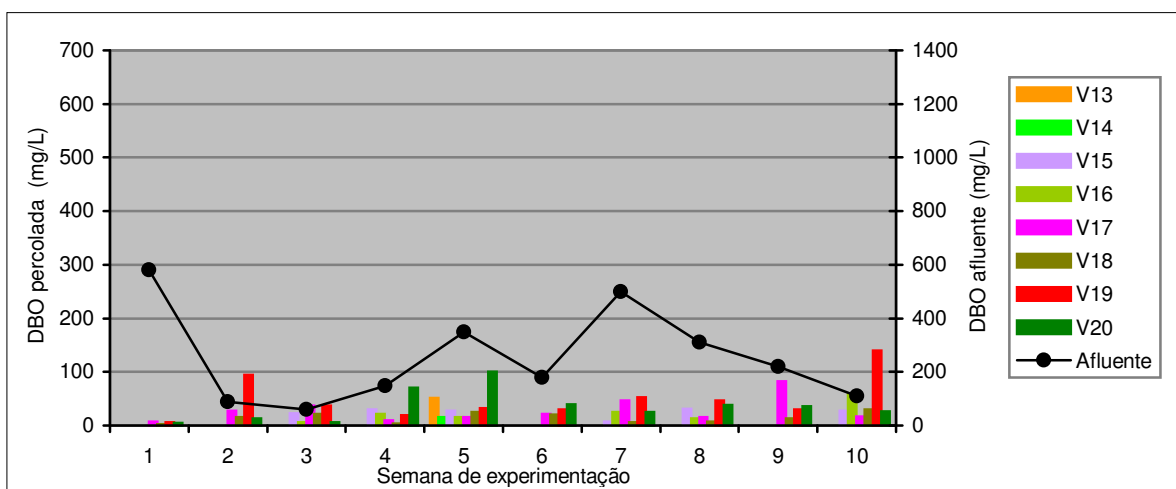


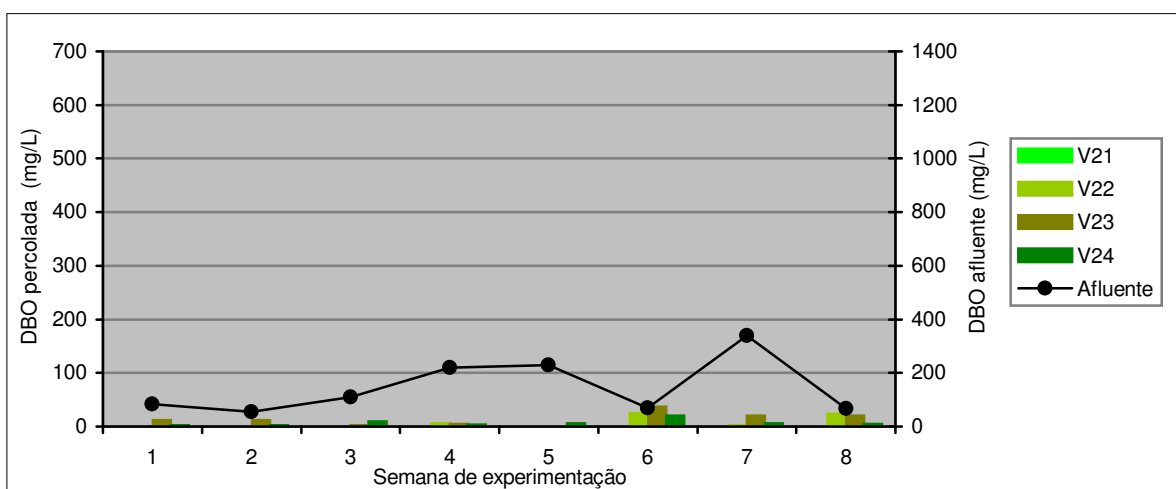
Figura B.9 – Resultados de concentração de DBO nas leiras da Fase 1



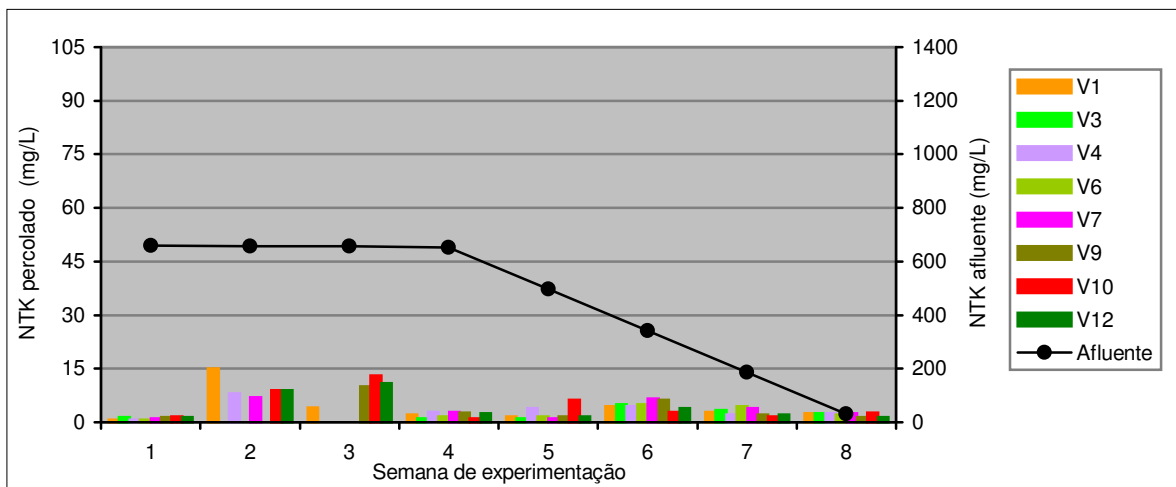
**Figura B.10** – Resultados de concentração de DBO nas leiras da Fase 2



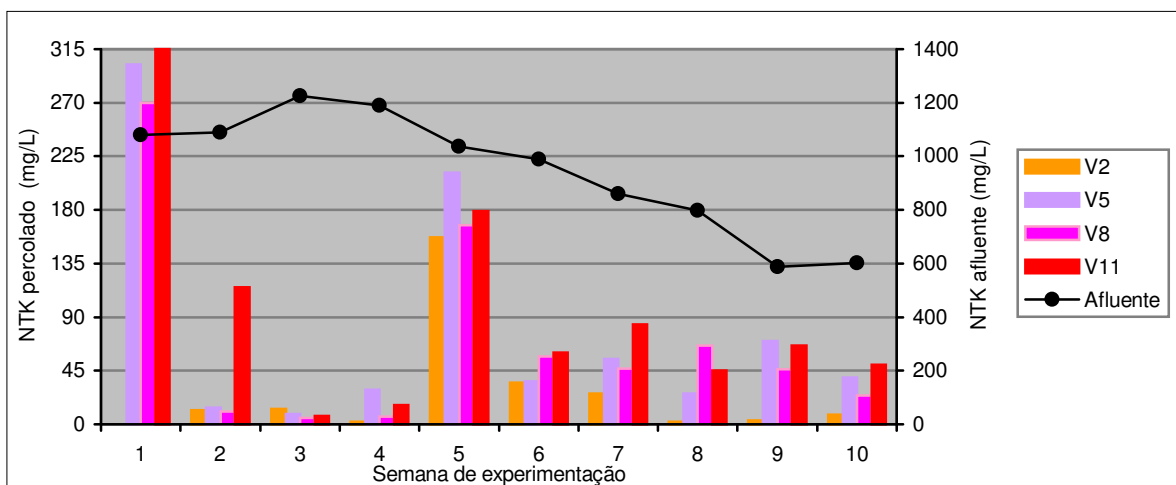
**Figura B.11** – Resultados de concentração de DBO nas leiras da Fase 3



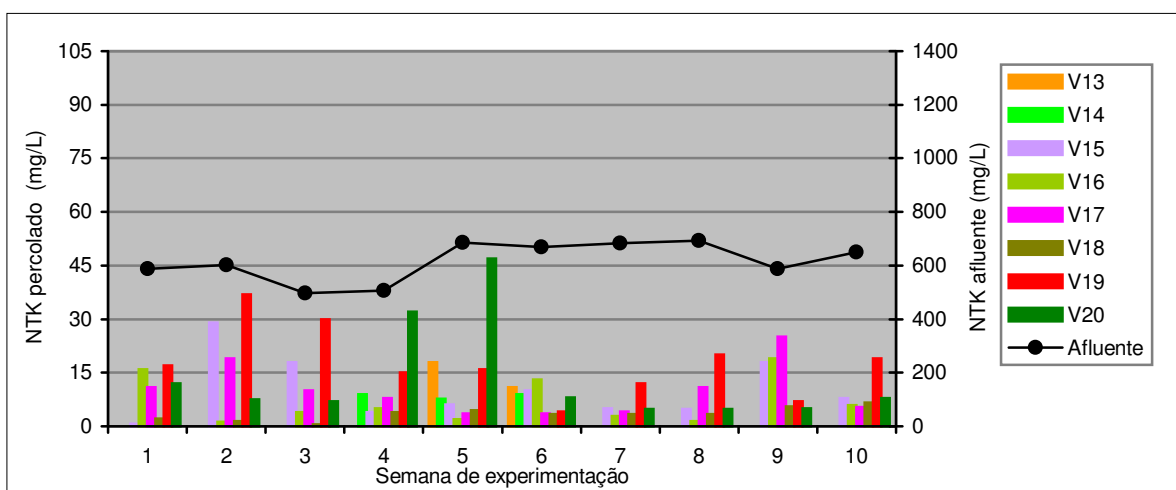
**Figura B.12** – Resultados de concentração de DBO nas leiras da Fase 4



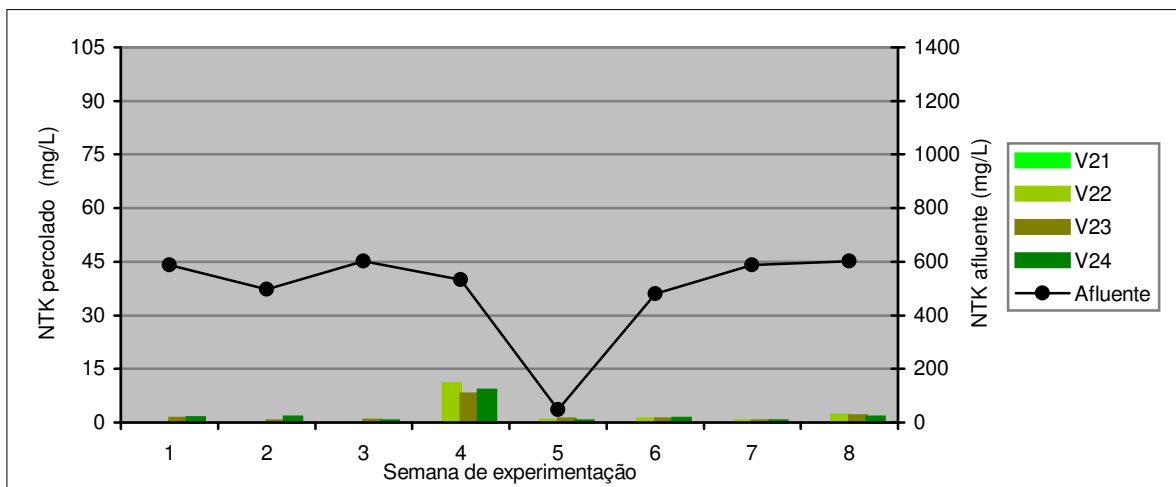
**Figura B.13** – Resultados de concentração de NTK nas leiras da Fase 1



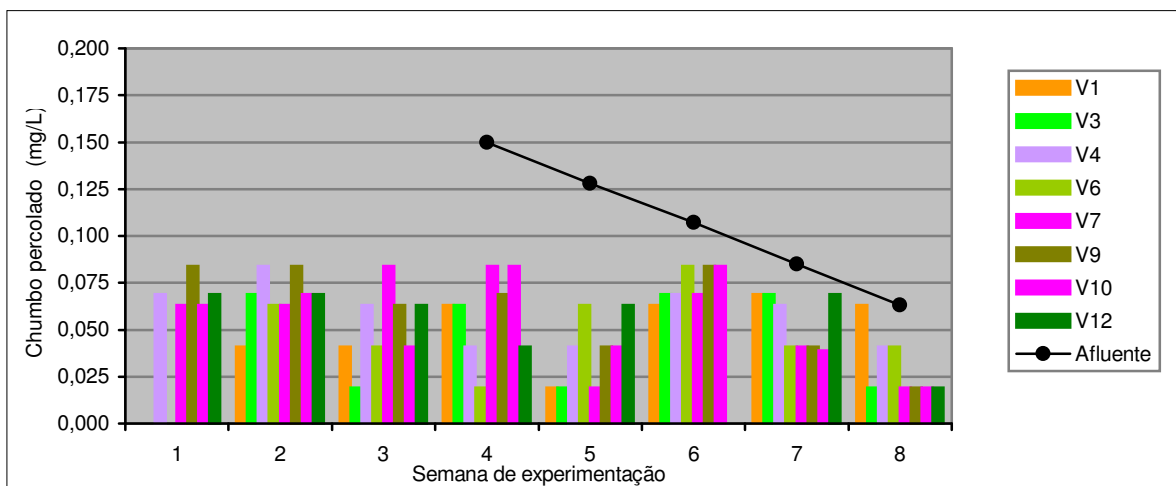
**Figura B.14** – Resultados de concentração de NTK nas leiras da Fase 2



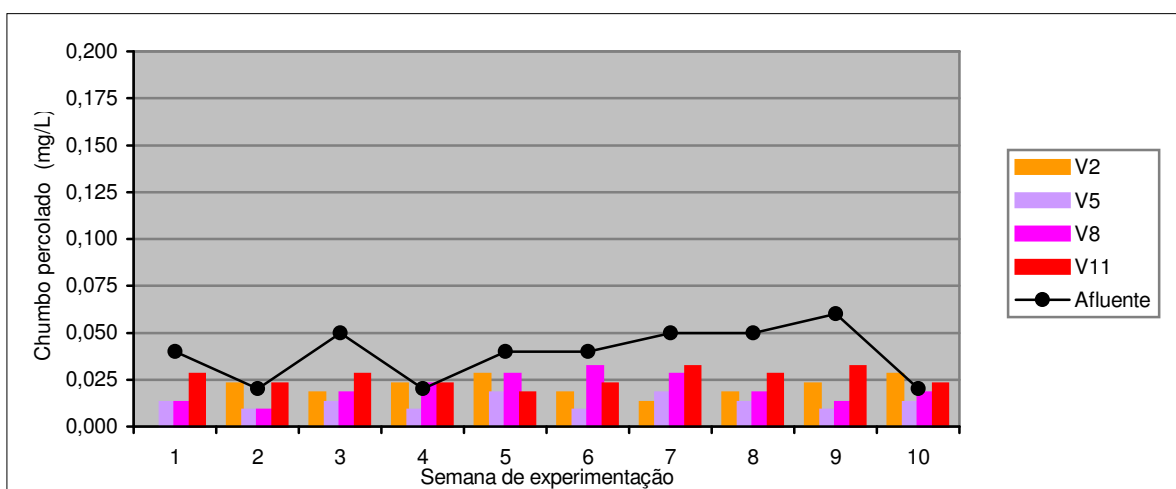
**Figura B.15** – Resultados de concentração de NTK nas leiras da Fase 3



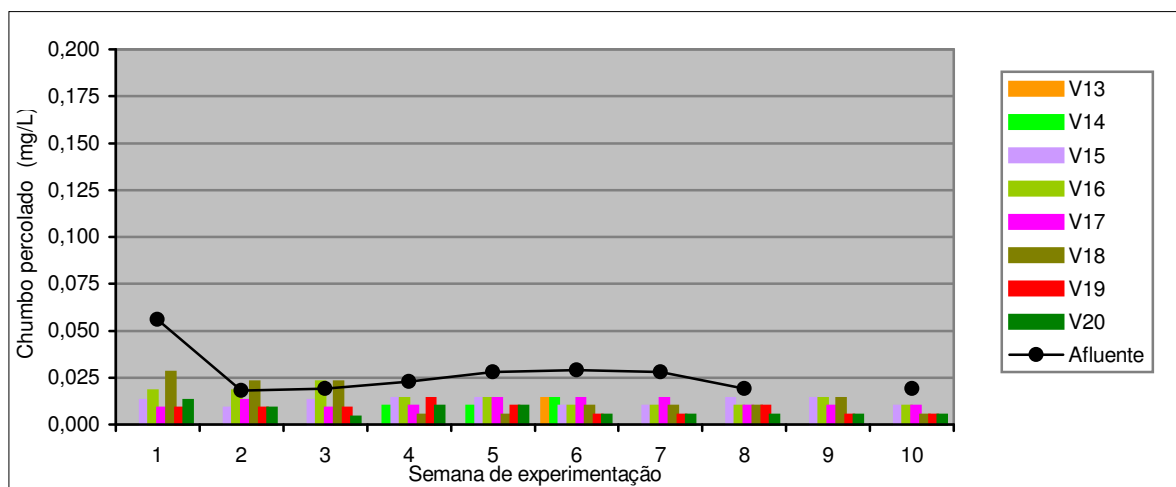
**Figura B.16** – Resultados de concentração de NTK nas leiras da Fase 4



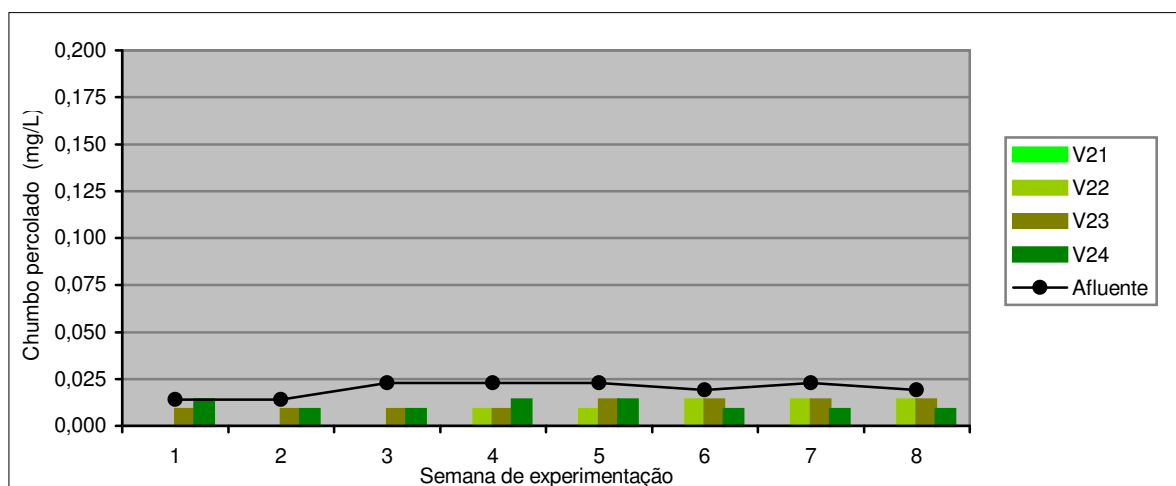
**Figura B.17** – Resultados de concentração de Pb nas leiras da Fase 1



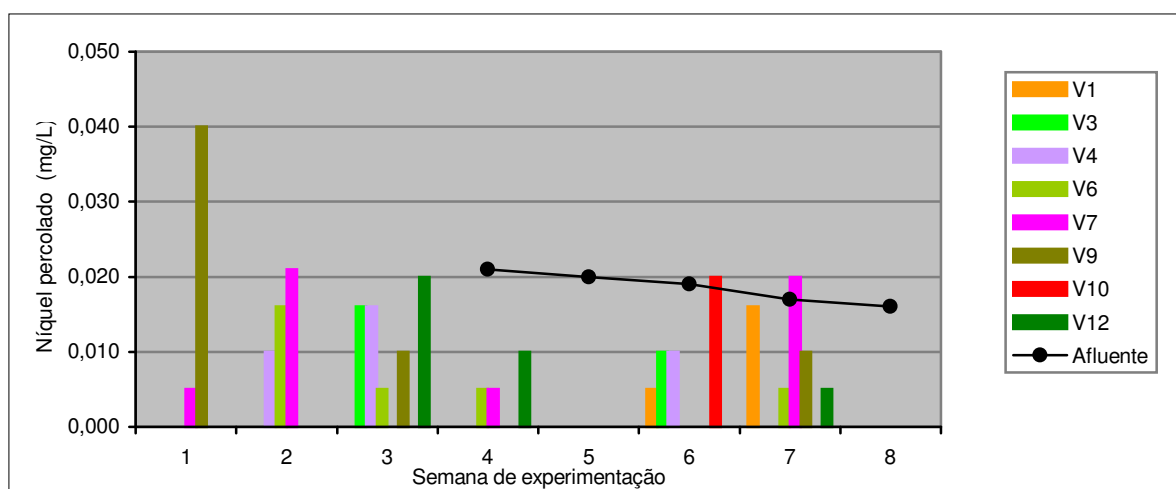
**Figura B.18** – Resultados de concentração de Pb nas leiras da Fase 2



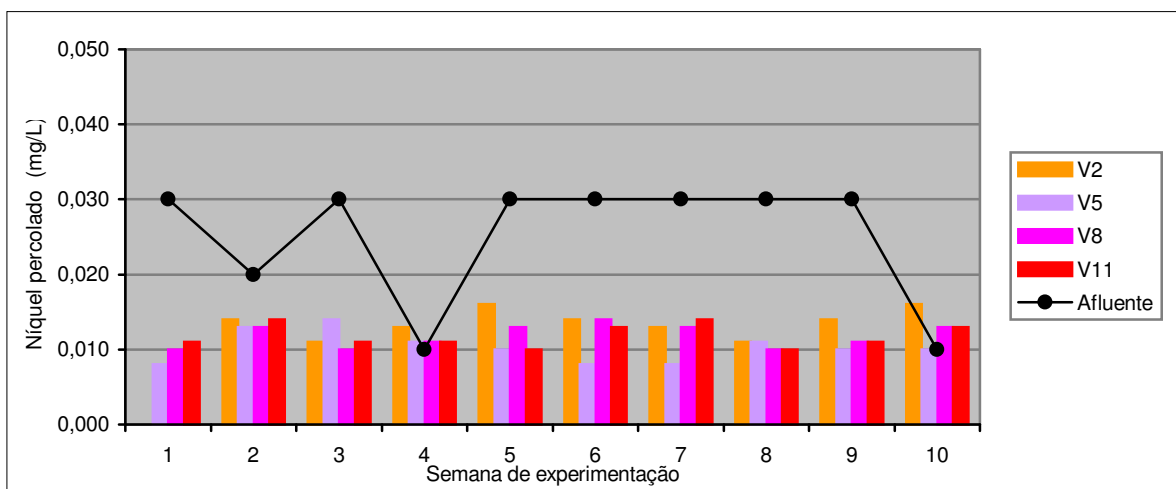
**Figura B.19** – Resultados de concentração de Pb nas leiras da Fase 3



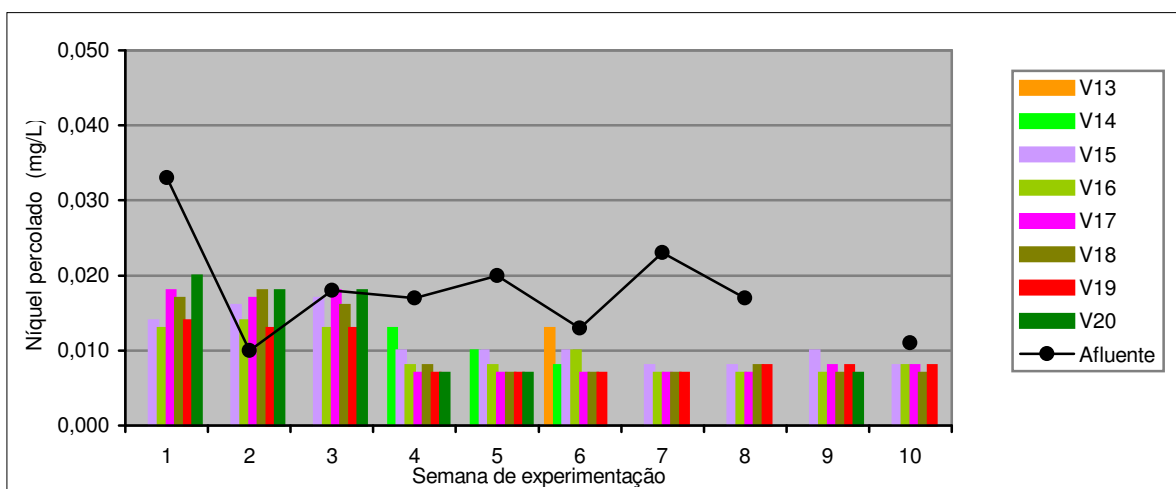
**Figura B.20** – Resultados de concentração de Pb nas leiras da Fase 4



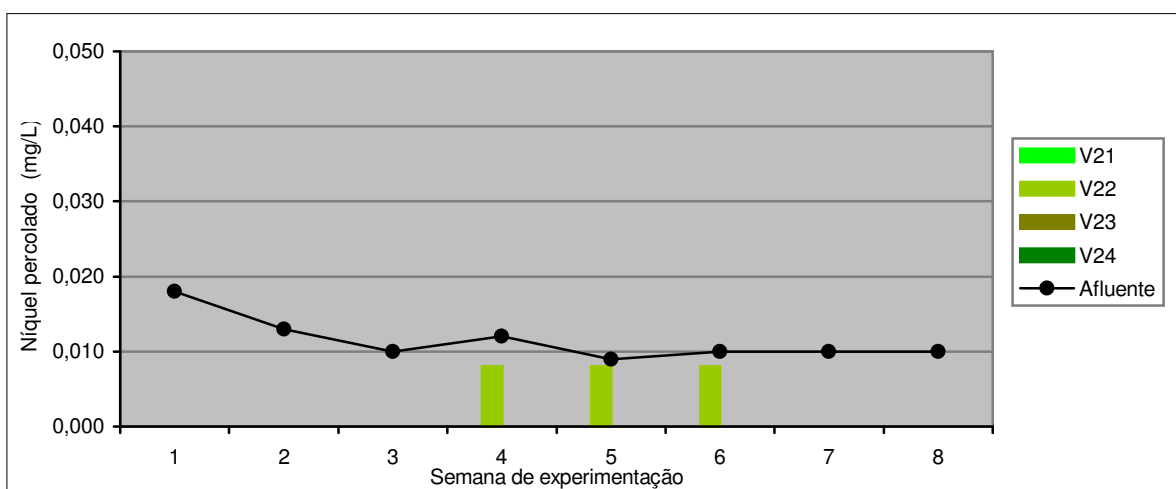
**Figura B.21** – Resultados de concentração de Ni nas leiras da Fase 1



**Figura B.22** – Resultados de concentração de Ni nas leiras da Fase 2

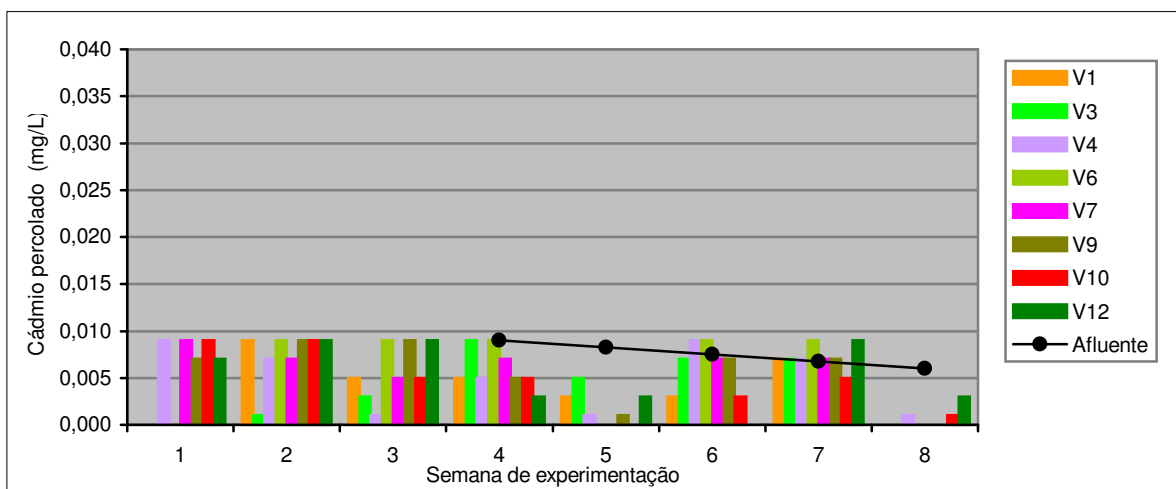


**Figura B.23** – Resultados de concentração de Ni nas leiras da Fase 3

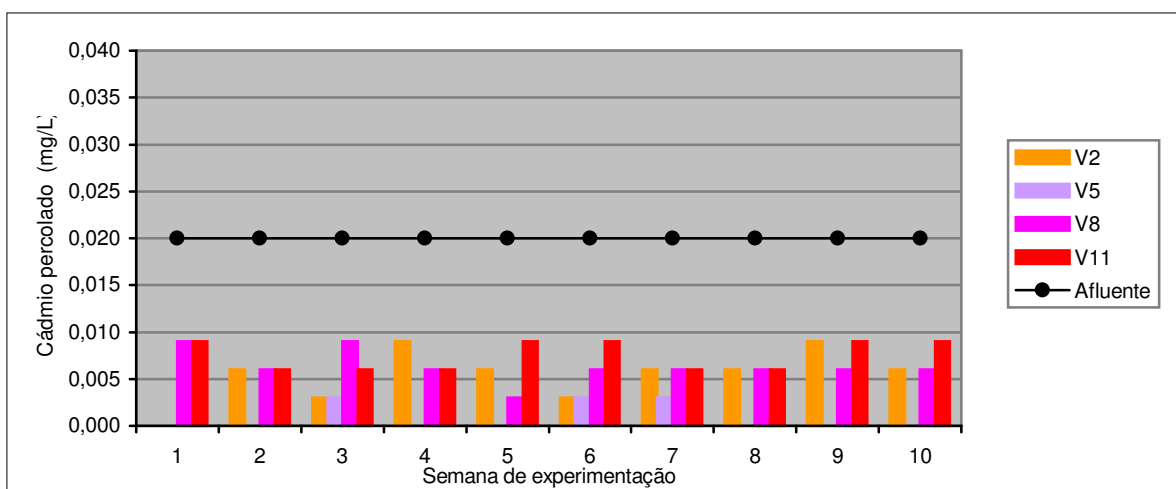


**Figura B.24** – Resultados de concentração de Ni nas leiras da Fase 4

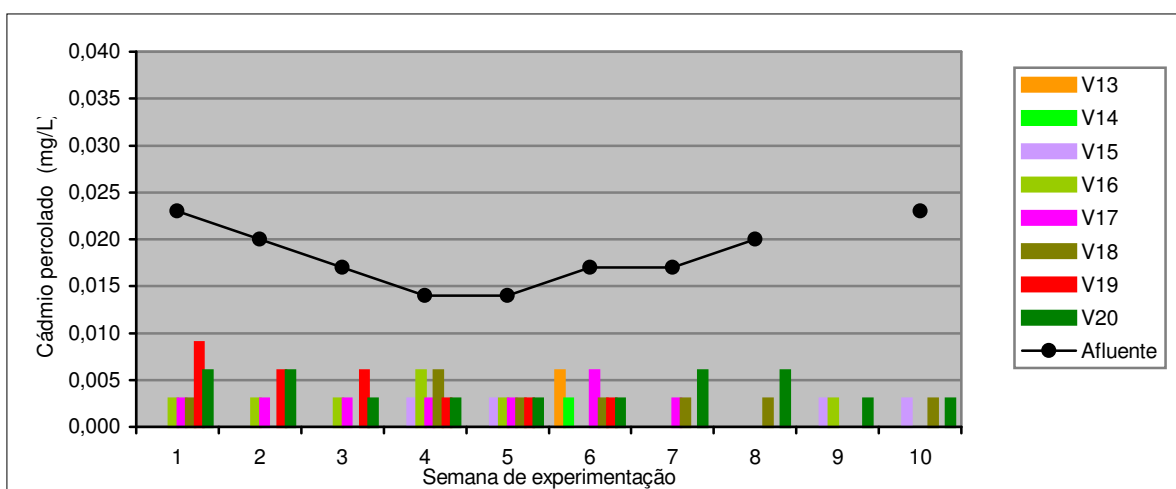




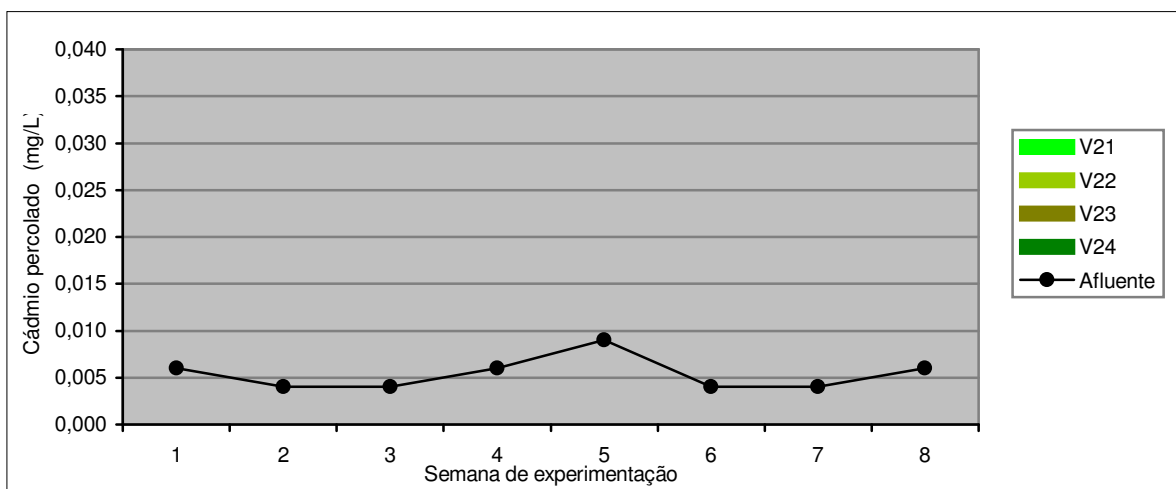
**Figura B.25** – Resultados de concentração de Cd nas leiras da Fase 1



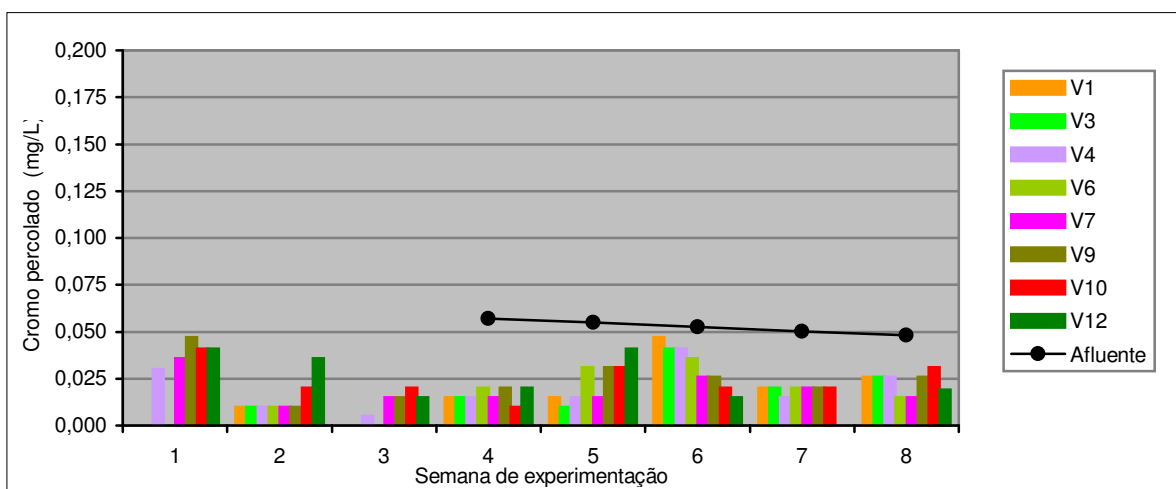
**Figura B.26** – Resultados de concentração de Cd nas leiras da Fase 2



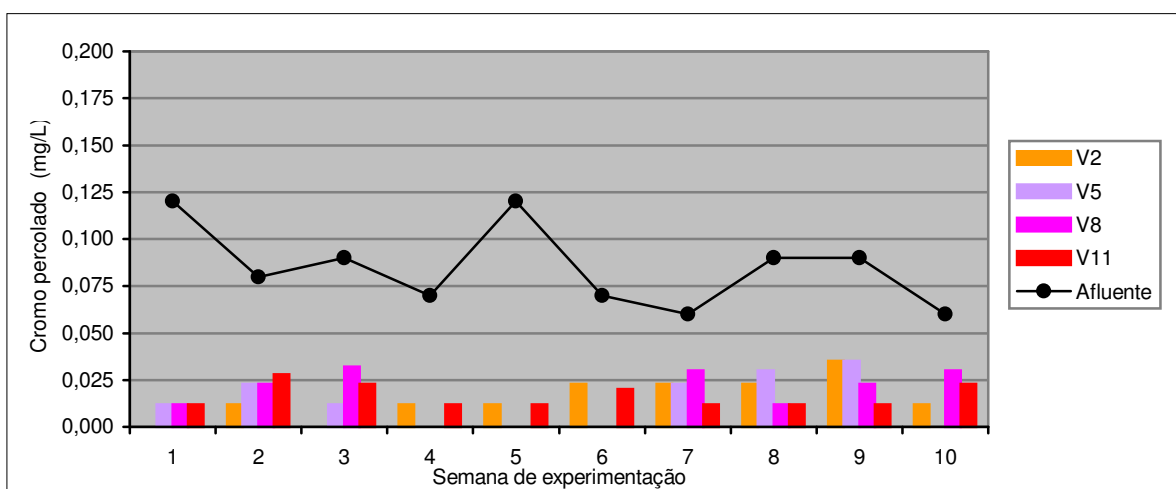
**Figura B.27** – Resultados de concentração de Cd nas leiras da Fase 3



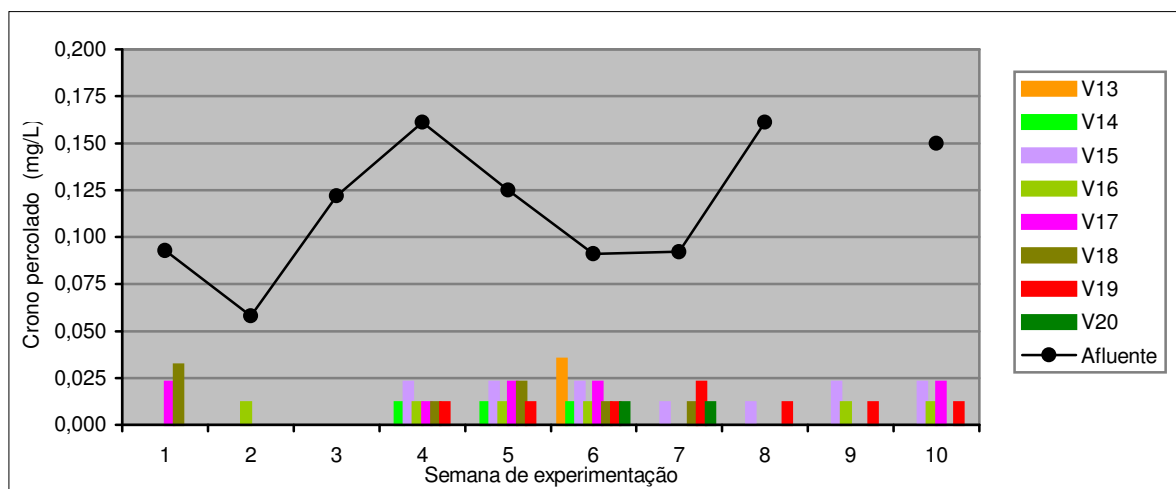
**Figura B.28** – Resultados de concentração de Cd nas leiras da Fase 4



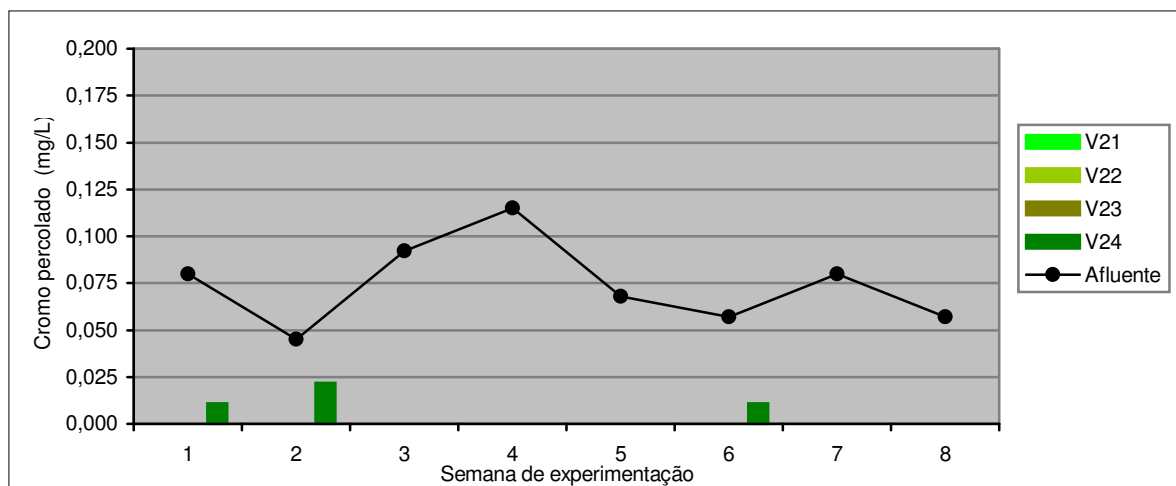
**Figura B.29** – Resultados de concentração de Cr nas leiras da Fase 1



**Figura B.30** – Resultados de concentração de Cr nas leiras da Fase 2



**Figura B.31** – Resultados de concentração de Cr nas leiras da Fase 3



**Figura B.32** – Resultados de concentração de Cr nas leiras da Fase 4

**A n e x o C**

**Tabelas de comparação com os padrões de emissão de efluentes da  
SSMA – Secretaria Estadual da Saúde e do Meio Ambiente**

**Tabela C.1 – Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos, para DQO**

| <b>Padrão da SSMA para DQO (vazão &lt; 200 m<sup>3</sup>/d): 360 mg/L</b> |           |                        |                            |       |        |   |
|---|-----------|------------------------|----------------------------|-------|--------|---|
| Fase  | Substrato | Leira / Taxa<br>(ml/d) | Concentração de DQO (mg/L) |       |        | Porcentagem das vezes<br>que atende padrão de<br>emissão da SSMA* (%) |
|   |           |                        | Mínimo                     | Médio | Máximo |   |
| 1   | Mistura   | V1 / 100               | 370                        | 424   | 560    | 0   |
|   |           | V4 / 155               | 340                        | 395   | 510    | 25  |
|   |           | V7 / 225               | 340                        | 420   | 530    | 12,5  |
|   |           | V10 / 300              | 380                        | 470   | 510    | 0   |
|   | Composto  | V3 / 100               | 150                        | 233   | 300    | 100   |
|   |           | V6 / 155               | 190                        | 269   | 330    | 100   |
|   |           | V9 / 225               | 180                        | 315   | 420    | 50  |
| 2   | Mistura   | V12 / 300              | 320                        | 416   | 510    | 12,5  |
|   |           | V2 / 100               | 380                        | 528   | 870    | 0 <sup>(1)</sup>  |
|   |           | V5 / 155               | 380                        | 658   | 1100   | 0   |
|   |           | V8 / 225               | 450                        | 636   | 960    | 0   |
| 3   | Mistura   | V11 / 300              | 544                        | 708   | 1080   | 0   |
|   |           | V13 / 150              | 524                        | 742   | 960    | 0 <sup>(2)</sup>  |
|   |           | V15 / 230              | 328                        | 523   | 700    | 10  |
|   |           | V17 / 330              | 190                        | 537   | 900    | 10  |
|   | Composto  | V19 / 440              | 368                        | 595   | 770    | 0   |
|   |           | V14 / 150              | 156                        | 171   | 196    | 100 <sup>(3)</sup>  |
|   |           | V16 / 230              | 91                         | 225   | 560    | 80  |
|   |           | V18 / 330              | 118                        | 216   | 400    | 90  |
| 4   | Composto  | V20 / 440              | 230                        | 320   | 464    | 70  |
|   |           | V21 / 150              | –                          | –     | –      | – <sup>(4)</sup>  |
|   |           | V22 / 230              | 80                         | 106   | 130    | 100 <sup>(5)</sup>  |
|   |           | V23 / 330              | 92                         | 135   | 180    | 100   |
|   |           | V24 / 440              | 40                         | 157   | 216    | 100   |

\* Portaria nº 05/89 – SSMA. Estabelece os critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados para lançamento de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul.

<sup>1</sup> Na leira V2, na primeira semana não houve geração de percolado.

<sup>2</sup> Na leira V13, em 8 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>3</sup> Na leira V14, em 7 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>4</sup> Na leira V21, não houve geração de percolado em nenhuma das 8 semanas.

<sup>5</sup> Na leira V22, em 3 das 8 semanas não houve geração de percolado.

Obs.: Nas Fases 1 e 4, foram 8 semanas (8 dados) de observação.

Nas Fases 2 e 3, foram 10 semanas de observação.

**Tabela C.2** – Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos, para DBO

| <b>Padrão da SSMA para DBO (vazão &lt; 200 m<sup>3</sup>/d): 120 mg/L</b> |           |                        |                            |       |        |   |
|---|-----------|------------------------|----------------------------|-------|--------|---|
| Fase  | Substrato | Leira / Taxa<br>(ml/d) | Concentração de DBO (mg/L) |       |        | Porcentagem das vezes<br>que atende padrão de<br>emissão da SSMA* (%) |
|   |           |                        | Mínimo                     | Médio | Máximo |   |
| 1   | Mistura   | V1 / 100               | 6                          | 36    | 120    | 100   |
|   |           | V4 / 155               | 6                          | 25    | 70     | 100   |
|   |           | V7 / 225               | 6                          | 38    | 100    | 100   |
|   |           | V10 / 300              | 20                         | 66    | 200    | 87,5  |
|   | Composto  | V3 / 100               | 4                          | 71    | 360    | 87,5  |
|   |           | V6 / 155               | 4                          | 36    | 70     | 100   |
|   |           | V9 / 225               | 5                          | 29    | 70     | 100   |
|   |           | V12 / 300              | 6                          | 31    | 120    | 100   |
| 2   | Mistura   | V2 / 100               | 2                          | 69    | 392    | 88,9 <sup>(1)</sup>   |
|   |           | V5 / 155               | 9                          | 110   | 340    | 60  |
|   |           | V8 / 225               | 17                         | 132   | 290    | 60  |
|   |           | V11 / 300              | 15                         | 165   | 590    | 70  |
| 3   | Mistura   | V13 / 150              | 51                         | 51    | 51     | 100 <sup>(2)</sup>  |
|   |           | V15 / 230              | 7                          | 24    | 31     | 100   |
|   |           | V17 / 330              | 8                          | 28    | 82     | 100   |
|   |           | V19 / 440              | 6                          | 49    | 140    | 90  |
|   | Composto  | V14 / 150              | 16                         | 16    | 16     | 100 <sup>(3)</sup>  |
|   |           | V16 / 230              | 6                          | 24    | 60     | 100   |
|   |           | V18 / 330              | 2                          | 14    | 30     | 100   |
|   |           | V20 / 440              | 4                          | 36    | 100    | 100   |
| 4   | Composto  | V21 / 150              | –                          | –     | –      | – <sup>(4)</sup>  |
|   |           | V22 / 230              | 2                          | 14    | 25     | 100 <sup>(5)</sup>  |
|   |           | V23 / 330              | 2                          | 15    | 37     | 100   |
|   |           | V24 / 440              | 2                          | 7     | 20     | 100   |

\* Portaria nº 05/89 – SSMA. Estabelece os critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados para lançamento de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul.

<sup>1</sup> Na leira V2, na primeira semana não houve geração de percolado.

<sup>2</sup> Na leira V13, em 9 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>3</sup> Na leira V14, em 9 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>4</sup> Na leira V21, não houve geração de percolado em nenhuma das 8 semanas.

<sup>5</sup> Na leira V22, em 3 das 8 semanas não houve geração de percolado.

Obs.: Nas Fases 1 e 4, foram 8 semanas (8 dados) de observação.

Nas Fases 2 e 3, foram 10 semanas de observação.

**Tabela C.3** – Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos, para NTK

| Padrão da SSMA para NTK: 10 mg/L |           |                        |                            |       |        |   |
|----------------------------------|-----------|------------------------|----------------------------|-------|--------|---|
| Fase                             | Substrato | Leira / Taxa<br>(ml/d) | Concentração de NTK (mg/L) |       |        | Porcentagem das vezes<br>que atende padrão de<br>emissão da SSMA* (%) |
|                                  |           |                        | Mínimo                     | Médio | Máximo |   |
| 1                                | Mistura   | V1 / 100               | 0,8                        | 4,2   | 15,0   | 87,5  |
|                                  |           | V4 / 155               | 0,0                        | 3,1   | 8,0    | 100   |
|                                  |           | V7 / 225               | 0,0                        | 3,1   | 7,0    | 100   |
|                                  |           | V10 / 300              | 1,1                        | 4,8   | 13,0   | 87,5  |
|                                  | Composto  | V3 / 100               | 0,0                        | 1,8   | 5,0    | 100   |
|                                  |           | V6 / 155               | 0,0                        | 2,0   | 5,0    | 100   |
|                                  |           | V9 / 225               | 0,0                        | 3,2   | 10,0   | 100   |
|                                  |           | V12 / 300              | 1,4                        | 4,1   | 11,0   | 87,5  |
| 2                                | Mistura   | V2 / 100               | 2,2                        | 28,7  | 157,0  | 44,4 <sup>(1)</sup>   |
|                                  |           | V5 / 155               | 8,4                        | 79,0  | 302,0  | 10  |
|                                  |           | V8 / 225               | 5,6                        | 70,0  | 270,0  | 20  |
|                                  |           | V11 / 300              | 7,0                        | 93,7  | 315,0  | 10  |
| 3                                | Mistura   | V13 / 150              | 11,0                       | 14,5  | 18,0   | 0 <sup>(2)</sup>  |
|                                  |           | V15 / 230              | 0,8                        | 10,3  | 29,0   | 70  |
|                                  |           | V17 / 330              | 3,5                        | 10,0  | 25,0   | 60  |
|                                  |           | V19 / 440              | 4,1                        | 17,7  | 37,0   | 20  |
|                                  | Composto  | V14 / 150              | 7,7                        | 8,6   | 9,0    | 100 <sup>(3)</sup>  |
|                                  |           | V16 / 230              | 1,3                        | 7,1   | 19,0   | 70  |
|                                  |           | V18 / 330              | 0,6                        | 3,5   | 6,7    | 100   |
|                                  |           | V20 / 440              | 4,8                        | 13,6  | 47,0   | 70  |
| 4                                | Composto  | V21 / 150              | –                          | –     | –      | – <sup>(4)</sup>  |
|                                  |           | V22 / 230              | 0,6                        | 3,1   | 11,0   | 80 <sup>(5)</sup>   |
|                                  |           | V23 / 330              | 0,5                        | 1,9   | 8,0    | 100   |
|                                  |           | V24 / 440              | 0,5                        | 2,1   | 9,2    | 100   |

\* Portaria nº 05/89 – SSMA. Estabelece os critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados para lançamento de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul.

<sup>1</sup> Na leira V2, na primeira semana não houve geração de percolado.

<sup>2</sup> Na leira V13, em 8 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>3</sup> Na leira V14, em 7 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>4</sup> Na leira V21, não houve geração de percolado em nenhuma das 8 semanas.

<sup>5</sup> Na leira V22, em 3 das 8 semanas não houve geração de percolado.

Obs.: Nas Fases 1 e 4, foram 8 semanas (8 dados) de observação.

Nas Fases 2 e 3, foram 10 semanas de observação.

**A n e x o D**  
**Tabelas de análise estatística**



**Tabela D.1** – Análise de médias e coeficiente de variação para DQO dentro das leiras

| Análise Coeficiente de Variação (Cv) - DQO   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|--|-----------------|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|----|----|----|-----|---|----------|----|----|----|-----|---|---------|----|----|----|-----|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|
| <b>FASE 1</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V1   | 8               | 460,6                    | 57,58        | 216,78500        | 14,72362           | 0,256     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V3   | 8               | 633,8                    | 79,23        | 78,37643         | 8,85305            | 0,112     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V4   | 8               | 480,8                    | 60,10        | 159,28571        | 12,62084           | 0,210     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V6   | 8               | 585,1                    | 73,14        | 53,52268         | 7,31592            | 0,100     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V7   | 8               | 456,2                    | 57,03        | 64,84786         | 8,05282            | 0,141     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V9   | 8               | 549,7                    | 68,71        | 141,69268        | 11,90347           | 0,173     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V10  | 8               | 424,0                    | 53,00        | 57,40571         | 7,57666            | 0,143     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V12  | 8               | 483,5                    | 60,44        | 75,52554         | 8,69054            | 0,144     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 2</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V2   | 10              | 696,7                    | 69,67        | 583,15344        | 24,14857           | 0,347     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V5   | 10              | 554,4                    | 55,44        | 814,18267        | 28,53389           | 0,515     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V8   | 10              | 571,9                    | 57,19        | 427,67656        | 20,68034           | 0,362     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V11  | 10              | 548,5                    | 54,85        | 356,69833        | 18,88646           | 0,344     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 3</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V13  | 10              | 983,5                    | 98,35        | 15,74500         | 3,96800            | 0,040     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V14  | 10              | 987,9                    | 98,79        | 4,46767          | 2,11369            | 0,021     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V15  | 10              | 802,2                    | 80,22        | 35,85511         | 5,98791            | 0,075     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V16  | 10              | 921,0                    | 92,10        | 9,90000          | 3,14643            | 0,034     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V17  | 10              | 728,7                    | 72,87        | 161,78678        | 12,71954           | 0,175     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V18  | 10              | 879,4                    | 87,94        | 15,10489         | 3,88650            | 0,044     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V19  | 10              | 584,3                    | 58,43        | 87,09567         | 9,33251            | 0,160     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V20  | 10              | 767,6                    | 76,76        | 44,90267         | 6,70095            | 0,087     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 4</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V21  | 8               | 800                      | 100          | 0,00000          | 0,00000            | 0,000     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V22  | 8               | 777                      | 97,14        | 10,39125         | 3,22355            | 0,033     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V23  | 8               | 750                      | 93,70        | 26,79143         | 5,17604            | 0,055     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V24  | 8               | 721                      | 90,06        | 33,94268         | 5,82603            | 0,065     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <p>Legenda:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>100</th> <th>155</th> <th>225</th> <th>300</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Mistura</td> <td>V1</td> <td>V4</td> <td>V7</td> <td>V10</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Composto</td> <td>V3</td> <td>V6</td> <td>V9</td> <td>V12</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Mistura</td> <td>V2</td> <td>V5</td> <td>V8</td> <td>V11</td> </tr> </tbody> </table><br><table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>150</th> <th>230</th> <th>330</th> <th>440</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>Mistura</td> <td>V13</td> <td>V15</td> <td>V17</td> <td>V19</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Composto</td> <td>V14</td> <td>V16</td> <td>V18</td> <td>V20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Composto</td> <td>V21</td> <td>V22</td> <td>V23</td> <td>V24</td> </tr> </tbody> </table> |                 |                          |              |                  |                    |           | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 100 | 155 | 225 | 300 | 1 | Mistura | V1 | V4 | V7 | V10 | 1 | Composto | V3 | V6 | V9 | V12 | 2 | Mistura | V2 | V5 | V8 | V11 | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 150 | 230 | 330 | 440 | 3 | Mistura | V13 | V15 | V17 | V19 | 3 | Composto | V14 | V16 | V18 | V20 | 4 | Composto | V21 | V22 | V23 | V24 |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 100                      | 155          | 225              | 300                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Mistura         | V1                       | V4           | V7               | V10                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Composto        | V3                       | V6           | V9               | V12                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 2  | Mistura         | V2                       | V5           | V8               | V11                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 150                      | 230          | 330              | 440                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Mistura         | V13                      | V15          | V17              | V19                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Composto        | V14                      | V16          | V18              | V20                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 4  | Composto        | V21                      | V22          | V23              | V24                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |

**Tabela D.2** – Análise de médias e coeficiente de variação para DBO dentro das leiras

| Análise Coeficiente de Variação (Cv) - <b>DBO</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|--|-----------------|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|----|----|----|-----|----------|----|----|----|-----|---|---------|----|----|----|-----|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|
| FASE 1   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| Dados DBO não foram analisados.  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| FASE 2   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V2   | 10              | 827,9                    | 82,79        | 597,61211        | 24,44611           | 0,295     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V5   | 10              | 717,9                    | 71,79        | 781,61878        | 27,95745           | 0,389     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V8   | 10              | 634,2                    | 63,42        | 1103,55511       | 33,21980           | 0,524     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V11  | 10              | 691,1                    | 69,11        | 627,42767        | 25,04851           | 0,362     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| FASE 3   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V13  | 9               | 899,0                    | 99,89        | 0,11111          | 0,33333            | 0,003     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V14  | 8               | 799,0                    | 99,88        | 0,12500          | 0,35355            | 0,004     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V15  | 6               | 550,0                    | 91,67        | 77,40667         | 8,79811            | 0,096     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V16  | 6               | 564,8                    | 94,13        | 38,34667         | 6,19247            | 0,066     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V17  | 10              | 894,6                    | 89,46        | 198,84267        | 14,10116           | 0,158     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V18  | 10              | 936,1                    | 93,61        | 70,28322         | 8,38351            | 0,090     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V19  | 10              | 776,0                    | 77,60        | 651,28444        | 25,52028           | 0,329     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V20  | 10              | 887,4                    | 88,74        | 81,89822         | 9,04976            | 0,102     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| FASE 4   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V21  | 8               | 800,0                    | 100          | 0                | 0,00000            | 0,000     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V22  | 7               | 670,0                    | 95,71        | 47,86476         | 6,91844            | 0,072     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V23  | 7               | 639,3                    | 91,33        | 155,82905        | 12,48315           | 0,137     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V24  | 8               | 765,8                    | 95,73        | 40,02214         | 6,32631            | 0,066     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <p>Legenda:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>100</th> <th>155</th> <th>225</th> <th>300</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">1</td> <td>Mistura</td> <td>V1</td> <td>V4</td> <td>V7</td> <td>V10</td> </tr> <tr> <td>Composto</td> <td>V3</td> <td>V6</td> <td>V9</td> <td>V12</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Mistura</td> <td>V2</td> <td>V5</td> <td>V8</td> <td>V11</td> </tr> </tbody> </table><br><table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>150</th> <th>230</th> <th>330</th> <th>440</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">3</td> <td>Mistura</td> <td>V13</td> <td>V15</td> <td>V17</td> <td>V19</td> </tr> <tr> <td>Composto</td> <td>V14</td> <td>V16</td> <td>V18</td> <td>V20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Composto</td> <td>V21</td> <td>V22</td> <td>V23</td> <td>V24</td> </tr> </tbody> </table> |                 |                          |              |                  |                    |           | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 100 | 155 | 225 | 300 | 1 | Mistura | V1 | V4 | V7 | V10 | Composto | V3 | V6 | V9 | V12 | 2 | Mistura | V2 | V5 | V8 | V11 | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 150 | 230 | 330 | 440 | 3 | Mistura | V13 | V15 | V17 | V19 | Composto | V14 | V16 | V18 | V20 | 4 | Composto | V21 | V22 | V23 | V24 |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 100                      | 155          | 225              | 300                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Mistura         | V1                       | V4           | V7               | V10                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  | Composto        | V3                       | V6           | V9               | V12                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 2  | Mistura         | V2                       | V5           | V8               | V11                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 150                      | 230          | 330              | 440                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Mistura         | V13                      | V15          | V17              | V19                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  | Composto        | V14                      | V16          | V18              | V20                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 4  | Composto        | V21                      | V22          | V23              | V24                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |

**Tabela D.3** – Análise de médias e coeficiente de variação para NTK dentro das leiras

| Análise Coeficiente de Variação (Cv) - NTK   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|--|-----------------|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|----|----|----|-----|---|----------|----|----|----|-----|---|---------|----|----|----|-----|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|
| <b>FASE 1</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V1   | 8               | 791,4                    | 98,93        | 0,88500          | 0,94074            | 0,010     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V3   | 8               | 793,8                    | 99,23        | 1,01929          | 1,00960            | 0,010     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V4   | 8               | 792,1                    | 99,01        | 0,96125          | 0,98043            | 0,010     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V6   | 8               | 792,4                    | 99,05        | 1,48286          | 1,21773            | 0,012     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V7   | 8               | 790,7                    | 98,84        | 1,54839          | 1,24434            | 0,013     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V9   | 8               | 792,8                    | 99,10        | 0,67429          | 0,82115            | 0,008     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V10  | 8               | 791,0                    | 98,88        | 0,65071          | 0,80667            | 0,008     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V12  | 8               | 793,0                    | 99,13        | 0,27929          | 0,52847            | 0,005     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 2</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V2   | 10              | 971,2                    | 97,12        | 42,21511         | 6,49732            | 0,067     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V5   | 10              | 937,9                    | 93,79        | 65,02767         | 8,06397            | 0,086     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V8   | 10              | 940,9                    | 94,09        | 38,90544         | 6,23742            | 0,066     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V11  | 10              | 930,2                    | 93,02        | 24,27956         | 4,92743            | 0,053     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 3</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V13  | 10              | 999,5                    | 99,95        | 0,01167          | 0,10801            | 0,001     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V14  | 10              | 999,0                    | 99,90        | 0,03111          | 0,17638            | 0,002     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V15  | 10              | 993,8                    | 99,38        | 0,45733          | 0,67626            | 0,007     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V16  | 10              | 996,2                    | 99,62        | 0,07511          | 0,27406            | 0,003     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V17  | 10              | 992,8                    | 99,28        | 0,66400          | 0,81486            | 0,008     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V18  | 10              | 997,5                    | 99,75        | 0,01833          | 0,13540            | 0,001     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V19  | 10              | 981,2                    | 98,12        | 1,46400          | 1,20996            | 0,012     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V20  | 10              | 985,5                    | 98,55        | 3,01611          | 1,73670            | 0,018     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 4</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V21  | 8               | 800,0                    | 100          | 0                | 0,00000            | 0,000     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V22  | 8               | 798,9                    | 99,86        | 0,05696          | 0,23867            | 0,002     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V23  | 8               | 798,4                    | 99,80        | 0,07143          | 0,26726            | 0,003     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V24  | 8               | 797,8                    | 99,73        | 0,09929          | 0,31510            | 0,003     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <p>Legenda:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>100</th> <th>155</th> <th>225</th> <th>300</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Mistura</td> <td>V1</td> <td>V4</td> <td>V7</td> <td>V10</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Composto</td> <td>V3</td> <td>V6</td> <td>V9</td> <td>V12</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Mistura</td> <td>V2</td> <td>V5</td> <td>V8</td> <td>V11</td> </tr> </tbody> </table><br><table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>150</th> <th>230</th> <th>330</th> <th>440</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>Mistura</td> <td>V13</td> <td>V15</td> <td>V17</td> <td>V19</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Composto</td> <td>V14</td> <td>V16</td> <td>V18</td> <td>V20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Composto</td> <td>V21</td> <td>V22</td> <td>V23</td> <td>V24</td> </tr> </tbody> </table> |                 |                          |              |                  |                    |           | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 100 | 155 | 225 | 300 | 1 | Mistura | V1 | V4 | V7 | V10 | 1 | Composto | V3 | V6 | V9 | V12 | 2 | Mistura | V2 | V5 | V8 | V11 | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 150 | 230 | 330 | 440 | 3 | Mistura | V13 | V15 | V17 | V19 | 3 | Composto | V14 | V16 | V18 | V20 | 4 | Composto | V21 | V22 | V23 | V24 |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 100                      | 155          | 225              | 300                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Mistura         | V1                       | V4           | V7               | V10                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Composto        | V3                       | V6           | V9               | V12                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 2  | Mistura         | V2                       | V5           | V8               | V11                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 150                      | 230          | 330              | 440                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Mistura         | V13                      | V15          | V17              | V19                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Composto        | V14                      | V16          | V18              | V20                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 4  | Composto        | V21                      | V22          | V23              | V24                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |

**Tabela D.4** – Análise de médias e coeficiente de variação para metais dentro das leiras

| Análise Coeficiente de Variação (Cv) - Metais (Pb, Ni, Cd, Cr)   |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|--|-----------------|--------------------------|--------------|------------------|--------------------|-----------|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|----|----|----|-----|---|----------|----|----|----|-----|---|---------|----|----|----|-----|------|-----------|--------------------------|--|--|--|-----|-----|-----|-----|---|---------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|---|----------|-----|-----|-----|-----|
| <b>FASE 1</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V1   | 5               | 295,6                    | 59,12        | 410,102          | 20,25098           | 0,343     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V3   | 5               | 311,4                    | 62,28        | 652,627          | 25,54657           | 0,410     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V4   | 5               | 303,0                    | 60,60        | 588,985          | 24,26901           | 0,400     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V6   | 5               | 286,7                    | 57,34        | 420,723          | 20,51153           | 0,358     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V7   | 5               | 319,6                    | 63,92        | 323,622          | 17,98950           | 0,281     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V9   | 5               | 297,2                    | 59,44        | 200,713          | 14,16732           | 0,238     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V10  | 5               | 302,9                    | 60,58        | 292,947          | 17,11569           | 0,283     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V12  | 4               | 267,0                    | 66,75        | 166,730          | 12,91240           | 0,193     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 2</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V2   | 10              | 769,7                    | 76,97        | 276,17344        | 16,61847           | 0,216     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V5   | 10              | 822,9                    | 82,29        | 65,50322         | 8,09341            | 0,098     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V8   | 10              | 710,5                    | 71,05        | 227,50944        | 15,08342           | 0,212     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V11  | 10              | 685,9                    | 68,59        | 202,02544        | 14,21357           | 0,207     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 3</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V13  | 9               | 894,8                    | 99,42        | 3,00444          | 1,73333            | 0,017     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V14  | 10              | 987,5                    | 98,75        | 4,09611          | 2,02389            | 0,020     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V15  | 9               | 831,3                    | 92,37        | 12,31500         | 3,50927            | 0,038     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V16  | 9               | 846,6                    | 94,07        | 8,34250          | 2,88834            | 0,031     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V17  | 9               | 817,2                    | 90,80        | 22,03250         | 4,69388            | 0,052     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V18  | 9               | 809,9                    | 89,99        | 25,01361         | 5,00136            | 0,056     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V19  | 9               | 800,7                    | 88,97        | 5,65750          | 2,37855            | 0,027     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V20  | 9               | 825,0                    | 91,67        | 15,57250         | 3,94620            | 0,043     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <b>FASE 4</b>  |                 |                          |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <i>Grupo</i>   | <i>Contagem</i> | <i>Soma</i>              | <i>Média</i> | <i>Variância</i> | <i>Desv Padrão</i> | <i>Cv</i> |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V21  | 8               | 800,0                    | 100          | 0                | 0,00000            | 0,000     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V22  | 8               | 776,4                    | 97,05        | 12,20857         | 3,49408            | 0,036     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V23  | 8               | 765,8                    | 95,73        | 9,39071          | 3,06443            | 0,032     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| V24  | 8               | 741,0                    | 92,63        | 29,02214         | 5,38722            | 0,058     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| <p>Legenda:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>100</th> <th>155</th> <th>225</th> <th>300</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Mistura</td> <td>V1</td> <td>V4</td> <td>V7</td> <td>V10</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>Composto</td> <td>V3</td> <td>V6</td> <td>V9</td> <td>V12</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Mistura</td> <td>V2</td> <td>V5</td> <td>V8</td> <td>V11</td> </tr> </tbody> </table><br><table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Fase</th> <th rowspan="2">Substrato</th> <th colspan="4">Taxa de aplicação (ml/d)</th> </tr> <tr> <th>150</th> <th>230</th> <th>330</th> <th>440</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td>Mistura</td> <td>V13</td> <td>V15</td> <td>V17</td> <td>V19</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>Composto</td> <td>V14</td> <td>V16</td> <td>V18</td> <td>V20</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>Composto</td> <td>V21</td> <td>V22</td> <td>V23</td> <td>V24</td> </tr> </tbody> </table> |                 |                          |              |                  |                    |           | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 100 | 155 | 225 | 300 | 1 | Mistura | V1 | V4 | V7 | V10 | 1 | Composto | V3 | V6 | V9 | V12 | 2 | Mistura | V2 | V5 | V8 | V11 | Fase | Substrato | Taxa de aplicação (ml/d) |  |  |  | 150 | 230 | 330 | 440 | 3 | Mistura | V13 | V15 | V17 | V19 | 3 | Composto | V14 | V16 | V18 | V20 | 4 | Composto | V21 | V22 | V23 | V24 |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 100                      | 155          | 225              | 300                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Mistura         | V1                       | V4           | V7               | V10                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 1  | Composto        | V3                       | V6           | V9               | V12                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 2  | Mistura         | V2                       | V5           | V8               | V11                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| Fase   | Substrato       | Taxa de aplicação (ml/d) |              |                  |                    |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
|  |                 | 150                      | 230          | 330              | 440                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Mistura         | V13                      | V15          | V17              | V19                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 3  | Composto        | V14                      | V16          | V18              | V20                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |
| 4  | Composto        | V21                      | V22          | V23              | V24                |           |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |    |    |    |     |   |          |    |    |    |     |   |         |    |    |    |     |      |           |                          |  |  |  |     |     |     |     |   |         |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |   |          |     |     |     |     |

**Tabela D.5** – Análise de médias e coeficientes de variação ( $C_v$ ) para redução das cargas de DQO por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação

| Grupo             | Contagem | Soma  | Média | Variância | Desvio Padrão | $C_v$ |
|-------------------|----------|-------|-------|-----------|---------------|-------|
| Fase 1 – Mistura  | 4        | 227,7 | 56,93 | 8,63958   | 2,93932       | 0,052 |
| Fase 1 – Composto | 4        | 281,5 | 70,38 | 62,49056  | 7,90510       | 0,112 |
| Fase 2 – Mistura  | 4        | 237,2 | 59,29 | 48,89682  | 6,99263       | 0,118 |
| Fase 3 – Mistura  | 4        | 309,9 | 77,47 | 275,73949 | 16,60541      | 0,214 |
| Fase 3 – Composto | 4        | 355,6 | 88,90 | 85,45109  | 9,24398       | 0,104 |
| Fase 4 – Composto | 4        | 380,9 | 95,23 | 18,47844  | 4,29866       | 0,045 |

**Tabela D.6** – Análise de médias e coeficientes de variação ( $C_v$ ) para redução das cargas de DBO por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação

| Grupo             | Contagem | Soma  | Média | Variância | Desvio Padrão | $C_v$ |
|-------------------|----------|-------|-------|-----------|---------------|-------|
| Fase 1 – Mistura  | –        | –     | –     | –         | –             | –     |
| Fase 1 – Composto | –        | –     | –     | –         | –             | –     |
| Fase 2 – Mistura  | 4        | 287,1 | 71,78 | 66,07956  | 8,12893       | 0,113 |
| Fase 3 – Mistura  | 4        | 358,6 | 89,65 | 84,71344  | 9,20399       | 0,103 |
| Fase 3 – Composto | 4        | 376,4 | 94,09 | 20,77367  | 4,55781       | 0,048 |
| Fase 4 – Composto | 4        | 382,8 | 95,69 | 12,53332  | 3,54024       | 0,037 |

“–”: resultados de DBO para Fase 1 não foram analisadas em função da não renovação semanal do lixiviado afluente e da grande variabilidade deste parâmetro, conforme tabela A.6.

**Tabela D.7** – Análise de médias e coeficientes de variação ( $C_v$ ) para redução das cargas de NTK por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação

| Grupo             | Contagem | Soma  | Média | Variância | Desvio Padrão | $C_v$ |
|-------------------|----------|-------|-------|-----------|---------------|-------|
| Fase 1 – Mistura  | 4        | 395,7 | 98,91 | 0,00573   | 0,07569       | 0,001 |
| Fase 1 – Composto | 4        | 396,5 | 99,13 | 0,00542   | 0,07360       | 0,001 |
| Fase 2 – Mistura  | 4        | 378,0 | 94,51 | 3,24230   | 1,80064       | 0,019 |
| Fase 3 – Mistura  | 4        | 396,7 | 99,18 | 0,58882   | 0,76735       | 0,008 |
| Fase 3 – Composto | 4        | 397,8 | 99,46 | 0,37710   | 0,61408       | 0,006 |
| Fase 4 – Composto | 4        | 399,4 | 99,85 | 0,01358   | 0,11654       | 0,001 |

**Tabela D.8** – Análise de médias e coeficientes de variação ( $C_v$ ) para redução das cargas de metais (Pb + Cd + Ni + Cr) por substrato, para as quatro diferentes taxas de aplicação

| Grupo             | Contagem | Soma  | Média | Variância | Desvio Padrão | $C_v$ |
|-------------------|----------|-------|-------|-----------|---------------|-------|
| Fase 1 – Mistura  | 4        | 244,2 | 61,06 | 4,12837   | 2,03184       | 0,033 |
| Fase 1 – Composto | 4        | 245,8 | 61,45 | 16,57036  | 4,07067       | 0,066 |
| Fase 2 – Mistura  | 4        | 298,9 | 74,73 | 37,80437  | 6,14853       | 0,082 |
| Fase 3 – Mistura  | 4        | 371,6 | 92,89 | 20,90148  | 4,57181       | 0,049 |
| Fase 3 – Composto | 4        | 374,5 | 93,62 | 14,50563  | 3,80863       | 0,041 |
| Fase 4 – Composto | 4        | 385,4 | 96,35 | 9,35958   | 3,05934       | 0,032 |

**Tabela C.4** – Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos, para  $\text{NO}_3^-$ 

| <b>Padrão da SSMA para <math>\text{NO}_3^-</math>: 10 mg/L</b> |           |                        |  |       |        |   |
|--|-----------|------------------------|--|-------|--------|---|
| Fase   | Substrato | Leira / Taxa<br>(ml/d) | Concentração de $\text{NO}_3^-$ (mg/L) |       |        | Porcentagem das vezes<br>que atende padrão de<br>emissão da SSMA* (%) |
|  |           |                        | Mínimo                                 | Médio | Máximo |   |
| 1  | Mistura   | V1 / 100               | 334                                    | 613   | 1006   | 0   |
|  |           | V4 / 155               | 492                                    | 1148  | 1935   | 0   |
|  |           | V7 / 225               | 803                                    | 1492  | 2208   | 0   |
|  |           | V10 / 300              | 1100                                   | 1846  | 3111   | 0   |
|  | Composto  | V3 / 100               | 93                                     | 529   | 877    | 0   |
|  |           | V6 / 155               | 567                                    | 1196  | 1750   | 0   |
|  |           | V9 / 225               | 773                                    | 1179  | 1863   | 0   |
| 2  | Mistura   | V12 / 300              | 1040                                   | 1726  | 2647   | 0   |
|  |           | V2 / 100               | 62                                     | 269   | 448    | 0 <sup>(1)</sup>  |
|  |           | V5 / 155               | 24                                     | 461   | 677    | 0   |
|  |           | V8 / 225               | 30                                     | 731   | 1371   | 0   |
| 3  | Mistura   | V11 / 300              | 160                                    | 848   | 1342   | 0   |
|  |           | V13 / 150              | 26                                     | 33    | 41     | 0 <sup>(2)</sup>  |
|  |           | V15 / 230              | 27                                     | 221   | 454    | 0   |
|  |           | V17 / 330              | 12                                     | 457   | 765    | 0   |
|  | Composto  | V19 / 440              | 243                                    | 711   | 1112   | 0   |
|  |           | V14 / 150              | 91                                     | 111   | 131    | 0 <sup>(3)</sup>  |
|  |           | V16 / 230              | 74                                     | 246   | 420    | 0   |
| 4  | Composto  | V18 / 330              | 280                                    | 503   | 788    | 0   |
|  |           | V20 / 440              | 485                                    | 671   | 892    | 0   |
|  |           | V21 / 150              | –                                      | –     | –      | – <sup>(4)</sup>  |
|  |           | V22 / 230              | 32                                     | 32    | 32     | 0 <sup>(5)</sup>  |
|  |           | V23 / 330              | 43                                     | 73    | 101    | 0   |
|  |           | V24 / 440              | 146                                    | 189   | 258    | 0   |

\* Portaria nº 05/89 – SSMA. Estabelece os critérios e padrões de efluentes líquidos a serem observados para lançamento de efluentes líquidos no Estado do Rio Grande do Sul.

<sup>1</sup> Na leira V2, na primeira semana não houve geração de percolado.

<sup>2</sup> Na leira V13, em 8 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>3</sup> Na leira V14, em 7 das 10 semanas não houve geração de percolado.

<sup>4</sup> Na leira V21, não houve geração de percolado em nenhuma das 8 semanas.

<sup>5</sup> Na leira V22, em 3 das 8 semanas não houve geração de percolado.

Obs.: Nas Fases 1 e 4, foram 8 semanas (8 dados) de observação.

Nas Fases 2 e 3, foram 10 semanas de observação.

**Tabela C.5** – Comparação com os padrões de emissão de efluentes líquidos, para metais

| <b>Padrão da SSMA para Pb: 0,5 mg/L; para Ni: 1,0 mg/L; para Cd: 0,1 mg/L; para Cr: 0,5 mg/L</b>            |           |                        |                               |       |        |  |
|---|-----------|------------------------|-------------------------------|-------|--------|--|
| Fase  | Substrato | Leira / Taxa<br>(ml/d) | Concentração de Metais (mg/L) |       |        | Porcentagem das vezes<br>que atende padrão de<br>emissão da SSMA (%) |
|   |           |                        | Mínimo                        | Médio | Máximo |  |
| Para todos os metais acima listados, as concentrações nos percolados ficaram abaixo dos limites de emissão. |           |                        |                               |       |        |  |