

**“ESTUDO DA VERMICOMPOSTAGEM DE LODO SEDIMENTADO
PROVENIENTE DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUAS
RESIDUÁRIAS DE INDÚSTRIA DE SUCOS CÍTRICOS.”**

JEFFERSON LUÍS COUTINHO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jurandyr Povinelli

DEDALUS - Acervo - EESC



31100017699



São Carlos

1996

Class. Tese-EESC

Curr. Zool

Tombo 1029/93

0746631

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

C871e

Coutinho, Jefferson Luís

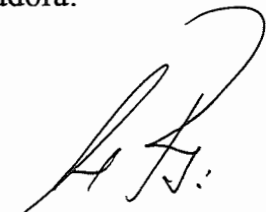
Estudo da vermicompostagem de lodo sedimentado
proveniente do processo de tratamento de águas
residuárias de indústria de sucos cítricos /
Jefferson Luís Coutinho. -- São Carlos, 1996.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1996.
Orientador: Prof. Dr. Jurandyr Povinelli.

1. Vermicompostagem. 2. Resíduos sólidos. 3.
Fertilidade. 4. Minhoca. I. Título

FOLHA DE APROVAÇÃO

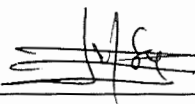
Dissertação defendida e aprovada em 27-11-1996
pela Comissão Julgadora:



Prof. Titular **JURANDYR POVINELLI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



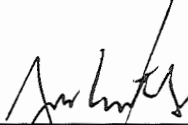
Profa. Doutora **MARIA DO CARMO CALIJURI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Doutor **JORGE AKUTSU**
(São Carlos, SP)



Prof. Dr. **EDUARDO CLETO PIRES**
Coordenador da área - Hidráulica e Saneamento



JOSE CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*Dedico este trabalho aos meus pais, Emília
e Sebastião, e à minha irmã, Rosenéia.*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Jurandyr Povinelli pela orientação e apoio fornecidos durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao CNPq pela bolsa de estudos concedida.

À CETESB de Novo Horizonte - SP, pelas orientações no controle do processo de vermicompostagem e pela cessão das minhocas.

À CITROSUCO Paulista de Matão - SP pelos resíduos cedidos.

Aos pesquisadores e técnicos da EMBRAPA de São Carlos - SP pelas orientações prestadas em algumas fases do trabalho.

Ao Departamento de Ciência do Solo da ESALQ-USP de Piracicaba pela realização de parte das análises e de forma especial ao Professor Dr. Jorge de Castro Kiehl pelas sugestões e auxílio na interpretação dos resultados.

Aos professores Carlos Diniz e José Carlos Fogo e ao aluno Valdecir do Departamento de Estatística da Universidade Federal de São Carlos pelo auxílio na realização da análise estatística dos resultados.

Aos funcionários dos Laboratórios do Departamento de Hidráulica e Saneamento pelo auxílio prestado durante a realização das análises laboratoriais.

À colega Eng. Luciana Rodrigues Valadares Veras pela convivência enriquecedora durante este período em que trabalhamos juntos.

À Maria Inês Pereira, à Alette Ap Meneghetti Spetic e à todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE ANEXOS	iii
LISTA DE ABREVIATURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Algumas considerações sobre a compostagem de resíduos sólidos	4
3.2. A vermicompostagem como forma de tratamento de resíduos sólidos	6
3.3. Breve panorama da vermicompostagem	7
3.4. Requisitos para o desenvolvimento da vermicompostagem	13
3.5. Características das minhocas e a escolha da espécie mais adequada	15
3.6. A qualidade do vermicomposto	18
3.7. As vantagens e os problemas da vermicompostagem	19
3.8. O papel da minhoca no solo	21
3.9. Considerações sobre a fertilidade do solo	22
3.9.1. Capacidade de troca catiônica (CTC)	26
3.9.2. Efeitos do potencial hidrogeniônico (pH) na fertilidade do solo	27
3.10. Formas encontradas, funções e efeitos dos macronutrientes e do alumínio nas plantas	28
3.10.1. Nitrogênio	31
3.10.2. Fósforo	32
3.10.2. Potássio	32
3.10.2. Cálcio	33
3.10.2. Magnésio	34
3.10.2. Alumínio	34

3.11. Níveis adequados dos macronutrientes e de alumínio para o desenvolvimento das plantas.....	36
3.12. Alterações provocadas nas plantas por deficiências ou excessos minerais.....	38
4. METODOLOGIA.....	43
4.1. Considerações gerais.....	43
4.2. O lodo utilizado como substrato.....	44
4.3. Classificação do lodo utilizado.....	48
4.4. Coleta do solo.....	49
4.5. Classificação do solo.....	49
4.6. Caracterização físico-química do lodo.....	49
4.7. Metodologia dos exames e análises físico-químicas do lodo.....	50
4.7.1. Umidade.....	50
4.7.2. Potencial hidrogeniônico (pH).....	50
4.7.3. Matéria orgânica total.....	51
4.7.4. Carbono total.....	51
4.7.5. Nitrogênio total.....	51
4.7.6. Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre totais.....	52
4.7.7. Relação carbono/nitrogênio.....	52
4.8. Caracterização físico-química do solo utilizado.....	52
4.9. Metodologia dos exames e análises físico-químicas do solo.....	53
4.9.1. Massa específica.....	53
4.9.2. Distribuição granulométrica.....	53
4.10. Montagem dos experimentos de vermicompostagem.....	53
4.11. Preparo das misturas do lodo com solo.....	56
4.12. A escolha da minhoca utilizada.....	57
4.13. Preparação das leiras para inoculação.....	57
4.14. Inoculação das leiras.....	58
4.15. Operação e controle do processo.....	59
4.16. Análises físico-químicas para fins de fertilidade.....	60
4.17. Metodologia das análises físico-químicas para fins de fertilidade.....	60
4.17.1. Potencial hidrogeniônico (pH).....	60

4.17.2. Matéria orgânica total	61
4.17.3. Fósforo	61
4.17.4. Potássio, cálcio e magnésio	61
4.17.5. Hidrogênio + Alumínio	61
4.17.6. Capacidade de troca catiônica (CTC)	62
4.17.7. Densidade aparente	62
4.18. Caracterização química das composições	62
4.19. Utilização das misturas no fim do processo para o plantio de rabanetes	62
4.20. Tratamento estatístico dos resultados	67
4.20.1 Análise de variância - ANOVA	69
4.20.2 Teste de Duncan para comparações múltiplas	73
4.20.3 Análise Não-Paramétrica - Teste de Kruskal-Wallis	74
4.20.4 Teste de Wilcoxon para comparações múltiplas	76
5. RESULTADOS	78
5.1. Classificação do lodo sedimentado proveniente do tratamento de águas residuárias da indústria de sucos cítricos	78
5.2. Classificação do solo utilizado juntamente com o lodo como substrato	78
5.3. Caracterização físico-química dos substratos (lodo e solo)	79
5.4. Controle de umidade	79
5.5. Caracterização química das composições	80
5.6. Análises químicas para fins de fertilidade das composições	80
5.7. Densidade aparente das composições	80
5.8. Evolução da população de minhocas	81
5.9. Produtividade dos rabanetes plantados nos diversos tratamentos	81
5.10. Tratamento estatístico dos resultados das análises químicas para fins de fertilidade e da densidade aparente	82
5.10.1. Potencial hidrogeniônico (pH)	83
5.10.2. Matéria orgânica total	84
5.10.3. Fósforo	85
5.10.4. Potássio	86
5.10.5. Cálcio	87

5.10.6. Magnésio	88
5.10.7. Hidrogênio + alumínio (H+Al)	88
5.10.8. Capacidade de troca catiônica (CTC)	89
5.10.9. Densidade aparente	90
5.11. Tratamento estatístico dos resultados da produção de matéria seca pelos rabanetes	90
6. DISCUSSÃO	92
6.1. Estabelecimento da duração dos experimentos	92
6.2. Controle da umidade	92
6.3. Potencial hidrogeniônico	93
6.4. Matéria orgânica total	93
6.5. Fósforo	94
6.6. Potássio	95
6.7. Cálcio	95
6.8. Magnésio	96
6.9. Hidrogênio + alumínio	96
6.10. Capacidade de troca catiônica (CTC)	97
6.8. Densidade aparente	98
6.8. Evolução da população de minhocas	98
6.8. Produção de rabanetes no vermicomposto	99
7. CONCLUSÕES	101
8. RECOMENDAÇÕES	103
9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	105
8. ANEXOS	110
8.1. Anexo A - Tabelas	110
8.2. Anexo B - Figuras	129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Funções dos macronutrientes.	29
Tabela 2 - Participação dos macronutrientes na formação e na qualidade da colheita.....	30
Tabela 3 - Teores de alguns elementos, classificados sob o aspecto da fertilidade dos solos no estado de São Paulo.....	37
Tabela 4 - Posicionamento aleatório dos sacos para o plantio do rabanete	64
Tabela 5 - Descrição das convenções utilizadas para a análise estatística.	68
Tabela 6 - Tabela ANOVA.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre pH e disponibilidade de elementos no solo.....	28
Figura 2 - Fluxograma de parte do tratamento de águas residuárias da CITROSUCO PAULISTA S/A.....	45
Figura 3 - Vista dos biodigestores.....	46
Figura 4 - Vista da lagoa anaeróbia	46
Figura 5 - Vista das lagoas aeradas.....	47
Figura 6 - Vista das lagoas de maturação.....	47
Figura 7 - Vista do lodo sedimentado no fundo da lagoa de maturação, após a drenagem, exposto ao sol.....	48
Figura 8 - Foto das caixas utilizadas na vermicompostagem.	55
Figura 9 - Vista dos vasos utilizados como controle do processo.	55
Figura 10 - Amostras das composições vermicompostadas e de controle	63
Figura 11 - Vista dos sacos prontos para o plantio dos rabanetes, dispostos de acordo com a tabela 4.....	64
Figura 12 - Vista geral da estufa montada para o plantio dos rabanetes.....	65
Figura 13 - Foto dos rabanetes recém-germinados (7 dias após o plantio).....	66
Figura 14 - Foto dos rabanetes após 20 dias do plantio.....	66
Figura 15 - Foto dos rabanetes no dia da colheita (60 dias após o plantio).....	67

LISTA DE ANEXOS

Tabela A-1 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização.....	111
Tabela A-2 - Análise granulométrica conjunta do solo.....	111
Tabela A-3 - Caracterização físico-química dos substratos (solo e lodo).....	112
Tabela A-4 - Análises químicas para fins de fertilidade dos substratos (solo e lodo).....	113
Tabela A-5 - Resultados das determinações de umidade.....	113
Tabela A-6 - Caracterização química das cinco composições antes do desenvolvimento da vermicompostagem.....	114
Tabela A-7 - Caracterização química das cinco composições após o processo de vermicompostagem.....	114
Tabela A-8 - Caracterização química das cinco composições, após o desenvolvimento da vermicompostagem, nas composições de controle (sem a presença de minhocas).....	115
Tabela A-9 - Resultados das análises para fins de fertilidade realizadas em 30/10/96, antes do desenvolvimento da vermicompostagem (3 amostras em cada composição).....	116
Tabela A-10 - Resultados das análises de fertilidade das cinco composições realizadas em 16/01/96, após o processo de vermicompostagem (3 amostras em cada composição).	117
Tabela A-11 - Resultados das análises de fertilidade das cinco composições realizadas em 16/01/96, após o desenvolvimento da vermicompostagem nas composições de controle - sem minhocas (3 amostras em cada composição).	118
Tabela A-12 - Densidade aparente dos substratos no início e no final do processo.	119

Tabela A-13 - População de minhocas com os respectivos pesos médios no final da vermicompostagem.....	119
Tabela A-14 - Massa produzida de rabanetes com umidade natural nas composições de controle (sem vermicompostagem).....	120
Tabela A-15 - Produção de matéria seca de rabanetes nas composições de controle (sem vermicompostagem).....	121
Tabela A-16 - Massa de rabanete produzida na umidade natural nas composições vermicompostadas.	122
Tabela A-17 - Produção de matéria seca de rabanetes nas composições vermicompostadas.....	123
Tabela A-18 - Testes de Kruskal-Wallis para as variáveis pH, Ca, H+Al e CTC.....	124
Tabela A-19 - Teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade dos resíduos.	124
Tabela A-20 - Teste de Bartlett.....	124
Tabela A-21 - Tabela ANOVA para MO_t	125
Tabela A-22 - Tabela ANOVA para fósforo (transformado).....	125
Tabela A-23 - Tabela ANOVA para potássio (transformado).	126
Tabela A-24 - Tabela ANOVA para magnésio.....	126
Tabela A-25 - Tabela ANOVA para densidade aparente.....	127
Tabela A-26 - Tabela ANOVA para a Parte Aérea do rabanete.	127
Tabela A-27 - Tabela ANOVA para o Bulbo do rabanete.....	128
Figura B-1 - Curva granulométrica do solo.....	130
Figura B-2 - Médias para o pH.....	130
Figura B-3 - Médias para porcentagem em volume de matéria orgânica total.....	131
Figura B-4 - Médias para as concentrações de fósforo.....	131
Figura B-5 - Médias para as concentrações de potássio.	132
Figura B-6 - Médias para as concentrações de cálcio.....	132

Figura B-7 - Médias para as concentrações de magnésio.	133
Figura B-8 - Médias para as concentrações de hidrogênio mais alumínio. .	133
Figura B-9 - Médias para a capacidade de troca catiônica.	134
Figura B-10 - Médias para a densidade aparente.	134
Figura B-11 - Minhocas retiradas da composição 1 no final do processo.	135
Figura B-12 - Minhocas retiradas da composição 2 no final do processo.	135
Figura B-13 - Minhocas retiradas da composição 3 no final do processo.	136
Figura B-14 - Minhocas retiradas da composição 4 no final do processo.	136
Figura B-15 - Minhocas retiradas da composição 5 no final do processo.	137
Figura B-16 - Rabanetes produzidos na composição 1.	137
Figura B-17 - Rabanetes produzidos na composição 2.	138
Figura B-18 - Rabanetes produzidos na composição 3.	138
Figura B-19 - Rabanetes produzidos na composição 4.	139
Figura B-20 - Rabanetes produzidos na composição 5.	139
Figura B-21 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para MO.	140
Figura B-22 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a MO.	140
Figura B-23 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o fósforo.	141
Figura B-24 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o fósforo.	141
Figura B-25 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o potássio.	142
Figura B-26 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o potássio.	142
Figura B-27 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o magnésio.	143
Figura B-28 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o magnésio.	143

Figura B-29 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para a densidade aparente.	144
Figura B-30 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a densidade aparente.	144
Figura B-31 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para pH.	145
Figura B-32 - Comparações múltiplas de Duncan para MO.	145
Figura B-33 - Comparações múltiplas de Duncan para o fósforo.	145
Figura B-34 - Comparações múltiplas de Duncan para o potássio.	146
Figura B-35 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para o cálcio.	146
Figura B-36 - Comparações múltiplas de Duncan para o magnésio.	146
Figura B-37 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para hidrogênio + alumínio.	147
Figura B-38 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para a CTC.	147
Figura B-39 - Comparações múltiplas de Duncan para densidade aparente.	147
Figura B-40 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para a parte aérea.	148
Figura B-41 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a parte aérea.	148
Figura B-42 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o bulbo.	149
Figura B-43 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o bulbo.	149
Figura B-44 - Comparações múltiplas de Duncan para Parte Aérea dos rabanetes.	150
Figura B-45 - Comparações múltiplas de Duncan para o Bulbo dos rabanetes.	150

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	- Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
CTC	- Capacidade de troca catiônica
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ	- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
EUA	- Estados Unidos da América
MO	- Matéria orgânica
NBR	- Norma Brasileira Registrada
ND	- Não detectado
SMP	- Solução preparada segundo Shoemaker, McLean e Pratt

LISTA DE SÍMBOLOS

$\mu\text{g/ml}$: microgramas por mililitro

Al(OH)_2 : hidróxido de alumínio II

Al: alumínio

AlSO_4 : sulfato de alumínio

B: boro

C/N: relação carbono nitrogênio

Ca: cálcio

Ca_t : cálcio total

Cl: cloro

CO_2 : dióxido de carbono

C_t : carbono total

Cu: cobre

Fe: ferro

g: gramas

H+Al: hidrogênio mais alumínio na forma iônica

H_2O : água

K: potássio

K_t : potássio total

m^2 : metro quadrado

meq/cm^3 : miliequivalente por centímetro cúbico

meq/ml : miliequivalente grama por mililitro

Mg: magnésio

Mg_t : magnésio total

Mn: manganês

MO_t : matéria orgânica total

N: nitrogênio

Na: sódio

NH₄: amônia

N_t: nitrogênio total

O₂: oxigênio

P: fósforo

pH: potencial hidrogeniônico

P_t: fósforo total

S: enxofre

Si: silício

S_t: enxofre total

Zn: zinco

RESUMO

A geração de resíduos sólidos nos processos industriais, em atividades domésticas e indiretamente como resultado do tratamento de efluentes líquidos e gasosos traz consigo a preocupação com o tratamento e disposição adequada de modo a não poluir e degradar o meio ambiente.

Este trabalho visa a contribuir para o equacionamento deste problema através do estudo da vermicompostagem como forma alternativa de condicionamento para posterior disposição no solo de lodo sedimentado proveniente de sistemas de tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos. Para isto realizou-se a vermicompostagem do lodo em questão consorciado com solo em diversas proporções. O acompanhamento do processo foi realizado através de procedimentos analíticos nas misturas e no vermicomposto. Utilizou-se resinas trocadoras de íons para a análise de alguns elementos, permitindo assim a determinação de sua fração quimicamente disponível para a absorção através do sistema radicular vegetal. Os resultados obtidos foram tratados e interpretados com o auxílio da estatística, sendo realizadas as seguintes avaliações: o efeito da variação da composição, o efeito do tempo, da vermicompostagem e as possíveis interações destes efeitos sobre cada um dos parâmetros.

Para uma avaliação preliminar da fertilidade do material produzido, realizou-se o plantio de rabanetes em cada uma das composições.

Os resultados indicaram que a vermicompostagem afeta algumas características das composições como a disponibilidade de alguns elementos e conseqüentemente a produção de matéria seca pela planta testada.

ABSTRACT

The solid waste production in the industrial process, in home operations and indirectly as liquid and gaseous effluent treatment result brings along with it the preoccupation concerning the appropriate treatment and disposition not to pollute and degrade the environment.

This work purpose is to contribute to this problem balance by the vermicomposting study as an alternative form of changing some characteristics in order to later disposition on the soil of sedimentar sludge from the citrus juice industry waste water treatment system. In order to this, the sludge vermicomposting in question was done merged with soil, in several ratios. The process accompaniment was done by analytic procedures in the mixtures and in the vermicompost. For the analysis of some elements, ions changing resin was utilized, allowing so the determination of its chemically available part to the absorption by the vegetable radicular system. The results obtained were handled and interpreted with the help of statistics, beeing done the following tests: the composition variation effect, the time effect, the vermicomposting effect and the possible interaction of these effects over each one of the parameters.

For a preliminary fertility avaiation of the matter produced, radish was planted in each one of the compositions.

The result indicated that the vermicomposting affects some characteristics of the compositions as the availability of some elements and, as a consequence, the dry matter production by the vegetable tested.

1. INTRODUÇÃO

O constante crescimento populacional e industrial tem provocado o aumento da quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos gerados.

Esses resíduos devem ter um destino adequado, dentro dos padrões sanitários, de modo a não poluir e degradar o meio ambiente.

A produção de resíduos sólidos (definidos segundo a NBR 10.004) vem crescendo, pois além de sua geração direta nos processos industriais e aglomerados urbanos, estão sendo também gerados nos tratamentos de efluentes líquidos e de emissões de poluentes para a atmosfera. Isso vem ocorrendo principalmente devido ao aumento das exigências e da fiscalização no controle da poluição das águas e do ar.

Muitos desses resíduos sólidos ainda não têm um destino adequado, sendo práticas tradicionais enterrá-los em um canto do terreno da própria empresa, depositá-los superficialmente no solo ou em aterros sanitários e lixões sem o controle necessário, ou ainda armazená-los em containers com destino e tempo indeterminados.

Essas práticas podem permitir que esses resíduos alcancem os corpos d'água, inutilizando dessa forma todos os esforços desenvolvidos pelas empresas no controle da qualidade de seus efluentes.

Face a este problema, tem-se pesquisado cada vez mais as diversas formas de tratamento e disposição final segura (aterros, incineração, estabilização química, solidificação, reutilização para outros processos, compostagem, etc.) de resíduos sólidos.

Entre as diversas formas de tratamento e disposição de resíduos sólidos, vem se destacando de forma promissora a vermicompostagem, ou seja, a produção de composto orgânico (húmus) através da digestão de material orgânico por minhocas.

A vermicompostagem, como vem sendo chamada, pode ser viabilizada como uma forma interessante de tratamento de resíduos sólidos orgânicos, com a possibilidade de utilização do composto resultante como condicionador de solo.

O presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento da vermicompostagem, através de seu estudo como forma de condicionamento para posterior disposição no solo de lodo sedimentado proveniente de sistemas de tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos (predominantemente suco de laranja).

Os resíduos que serão estudados, visando à utilização da vermicompostagem para melhorar suas características, são provenientes da indústria de sucos cítricos CITROSUCO PAULISTA S/A da cidade de Matão - SP. Tais resíduos vêm sendo dispostos diretamente na superfície do solo, em área da própria empresa onde se desenvolvem culturas de eucaliptos.

2. OBJETIVO

Os objetivos da pesquisa são: a verificação da possibilidade do emprego da vermicompostagem utilizando lodo sedimentado proveniente do tratamento dos efluentes líquidos de indústria de sucos cítricos consorciado com solo e a utilização do composto resultante para estudo de sua fertilidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Algumas considerações sobre a compostagem de resíduos sólidos

PEREIRA NETO (1989) define a compostagem como sendo um processo aeróbio controlado, desenvolvido por uma colônia mista de microrganismos, em duas fases distintas: a primeira fase, de oxidação intensa, e a segunda fase, ou fase de maturação, caracterizada pelo processo de humificação.

De maneira semelhante, RAMEH (1981) define a compostagem como um processo biológico de decomposição controlada da fração orgânica contida nos resíduos sólidos de modo a resultar um produto estável, similar ao húmus, cuja principal aplicação é a utilização como condicionador de solo para a agricultura.

Muitos são os fatores que interferem na compostagem, destacando-se, segundo PEREIRA NETO (1989) e RAMEH (1981) os seguintes:

- a taxa de aeração;
- a temperatura;
- a umidade;
- a concentração de nutrientes;
- o tamanho das partículas;
- a natureza da matéria orgânica;

- tamanho e natureza da população microbiana.

A compostagem é um processo aplicável no tratamento de grande variedade de resíduos orgânicos, tendo como vantagem o aproveitamento do composto resultante.

Como se sabe, a compostagem é um processo desenvolvido por uma colônia muito diversificada de microrganismos. Nesta população microbiológica, pode haver microrganismos patogênicos, principalmente se houver presença de resíduos de origem animal, inclusive humana.

Um dos objetivos da compostagem é produzir um composto livre de microrganismos patogênicos, com a finalidade de eliminar os riscos de sua utilização.

Um composto, para ser considerado seguro bacteriologicamente, de acordo com PEREIRA NETO (1989), deve apresentar níveis indetectáveis de salmonela e contagem inferior a cem de *Escherichia coli* e *estreptococos* por grama de composto.

Essa redução de microrganismos patogênicos, a níveis seguros, em geral é conseguida na compostagem pelo aumento da temperatura durante a fase de oxidação intensa da matéria orgânica (HARRIS et al., 1990).

Portanto, qualquer processo de compostagem que utilize resíduo com indicação de presença de microrganismos patogênicos deve passar por um processo de compostagem que os reduza a níveis seguros para a posterior utilização do composto.

Pelo exposto até o momento, de maneira geral, qualquer processo de compostagem pode ser dividido em 3 operações básicas: preparação da matéria prima, estabilização e maturação (humificação) do composto para posterior uso.

É de suma importância a estabilização da matéria orgânica até a humificação para que o composto possa ser utilizado como condicionador de solos.

Segundo PEREIRA NETO (1989), a utilização de compostos antes da maturação pode ocasionar vários efeitos nocivos ao plantio, tais como:

- a liberação de amônia, que pode danificar as raízes das culturas;
- alta relação C/N, que ocasionará a redução bioquímica do nitrogênio do solo;
- ocorrência de produção de toxinas inibidoras do metabolismo das plantas e germinação das sementes.

A compostagem, desenvolvida segundo critérios básicos de controle, é um processo seguro, de grande eficiência no tratamento de resíduos orgânicos.

Todavia, para qualquer processo de tratamento, exige-se a participação de profissionais capacitados e que possam suprir todas as necessidades biológicas requeridas durante esse processo. Observado esse requisito básico, haverá garantia de tratamento adequado dos resíduos e a produção de composto em elevado estado de humificação e bacteriologicamente seguro.

3.2. A vermicompostagem como forma de tratamento de resíduos sólidos

A vermicompostagem é um tipo de compostagem em que se utiliza a minhoca como participante da degradação e humificação de resíduos sólidos orgânicos. Isso é feito seguindo o exemplo do ciclo natural da decomposição da matéria orgânica no solo, onde a decomposição é realizada por associações de organismos, dentre os quais estão as minhocas.

A utilização desse processo é recente, segundo CARMODY (1979). Os estudos sobre a vermicompostagem de resíduos tiveram início praticamente na década de 70, tendo como exemplos 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.

De acordo com a CETESB (1987), pode-se obter a vermicompostagem da maioria dos resíduos sólidos, desde que estes contenham matéria orgânica.

O processo é relativamente simples, desde que sejam observados alguns requisitos básicos, a exemplo de qualquer outro processo biológico, tais como: temperatura, umidade, pH e certa porosidade do meio para que permita a sua aeração.

A velocidade do processo é relativamente rápida, pois as minhocas digerem, diariamente, o equivalente ao seu próprio peso, sendo que deste total ingerido, cerca de 60% é transformado em húmus ou vermicomposto (CETESB, 1987).

Esse potencial das minhocas em processar resíduos sólidos orgânicos, segundo APPELHOF (1981) levou pessoas extremamente otimistas, que atuam nessa área, a afirmarem que a vermicompostagem seria “a solução para nossos problemas com resíduos sólidos”, em uma mostra de vermicompostagem realizada pela National Science Fundation, em abril de 1980 em Kalamazoo, Michigan. Esse evento contou com a participação de 44 expositores selecionados em todo o mundo pelos seus conhecimentos na biologia, ecologia e fisiologia das minhocas e pelas suas experiências práticas em aplicações de vermicompostagem.

3.3. Breve panorama da vermicompostagem

A vermicompostagem, como tecnologia recente, tem um longo caminho de pesquisa a percorrer, necessitando ainda de trabalhos científicos e aplicações em escala real para a obtenção de diversos dados. Com isso, pode-

se conhecer, melhorar e difundir esse processo para tratamento de resíduos sólidos.

MITCHELL et al. (1977) estudaram a vermicompostagem de 4 tipos de lodos diferentes provenientes do tratamento secundário de esgoto doméstico, utilizando a *Eisenia foetida*. Esse estudo teve a finalidade de avaliar o desempenho do referido anelídeo para processar tais lodos, dos quais 3 eram anaeróbios e um aeróbio. Desses lodos anaeróbios, 2 foram, inicialmente, extremamente tóxicos para as minhocas. O outro lodo anaeróbio já apresentou uma toxicidade menor, enquanto que o lodo aeróbio foi vorazmente consumido pelas minhocas.

A disposição desses lodos anaeróbios no solo, expostos ao ar, fez com que a toxicidade fosse desaparecendo gradualmente e ao final de dois meses os lodos estivessem sendo vermicompostados sem problemas. Entretanto a população de minhocas no lodo aeróbio era quatro vezes maior do que nos três lodos anaeróbios ao final desses dois meses. A população de minhocas do lodo aeróbio já apresentava um declínio natural de 8% em relação ao início do experimento.

Nesses experimentos, também pôde ser verificado que a decomposição do lodo de esgoto parece ser acelerada de 2 a 5 vezes pela presença de minhocas (a *Eisenia foetida*).

DINDAL (1978) pesquisou as relações biológicas entre os diversos organismos participantes da decomposição, incluindo, além dos microrganismos, os anelídeos e artrópodes. Ele relata algumas experiências realizadas como a irrigação do solo com lodo de esgoto, na Universidade Estadual da Pensilvânia, onde se verificou o desenvolvimento natural de minhocas na área irrigada, aumentando a velocidade de decomposição dessa matéria orgânica, melhorando as qualidades do solo, como umidade e porosidade, favorecendo o desenvolvimento de microrganismos aeróbios do solo.

FRANZ (1978) reuniu e publicou os resultados obtidos por diversos pesquisadores, apresentando diversos dados sobre a compostagem.

Segundo esse trabalho, a temperatura ideal para o desenvolvimento da vermicompostagem está em torno de 20 °C. Entretanto, temperaturas até aproximadamente 2°C não causarão a morte das minhocas, mas praticamente cessarão a vermicompostagem. Temperaturas superiores a 26°C poderão causar a morte das minhocas.

Os solos tratados com vermicomposto apresentam concentrações superiores de P, K, Ca, Fe, e Mn aos solos tratados com composto convencional, sendo as concentrações de N, Mg e Zn, similares em ambos os casos.

Outro resultado apresentado é que a vermicompostagem pode ser utilizada diretamente em lagoas de lodo seco, ao invés de removê-lo para tratamento. Concluiu também que o composto resultante é de excelente qualidade, tendo sido testado em culturas experimentais de tomate, girassol e milho.

A minhoca também pode ter valor comercial, pois ela (a *Eisenia foetida*), contém de 12% a 15% de seu peso em proteínas, e estas são relativamente ricas em aminoácidos essenciais. Esse poder nutritivo foi testado em frangos e porcos recém desmamados com sucesso.

CARMODY (1979) realizou uma revisão das pesquisas e projetos de vermicompostagem em âmbito mundial até o ano de 1979. Foram citados estudos realizados nos Estados Unidos, Canadá, Japão e Europa sobre a utilização de minhocas como forma de tratamento de resíduos sólidos.

A experiência realizada em 1971 no Japão diz respeito ao tratamento de lodos de polpa de papel, com sucesso na vermicompostagem. Esta experiência inicial incentivou os japoneses, que em 1979 já possuíam cerca de 400 instalações de vermicompostagem, utilizando como substrato esterco animal, lodos de fermentadores e outros resíduos, além de possuírem uma associação

de produtores com aproximadamente 600 membros. O composto vem sendo combinado com fertilizantes químicos pelas companhias e também vem sendo pesquisada a utilização de uma substância incorporada no composto pelas minhocas que possui um potencial antipirético (abaixa a febre).

A França também vem trabalhando nesse campo desde 1975. Entre os muitos projetos, está a vermicompostagem de lodos de tratamento de esgotos, sendo testada a viabilidade de tratamento do lodo primário e lodo proveniente de tratamento pelo processo de lodos ativados. O teste com lodo primário não deu bom resultado, mas com os resíduos provenientes do sistema de lodos ativados foi de grande sucesso. Neste último uma tonelada de minhocas processaram 6 tanques sucessivos de 1 a 2 toneladas de lodo cada, em 24 a 36 horas por tanque.

Em South Bronx, na cidade de Nova York, vêm sendo vermicompostados resíduos de 2 edifícios de apartamentos. Os moradores separam a parte biodegradável dos demais componentes, sendo estes últimos também separados segundo sua categoria (vidro, plástico, etc.). A fração biodegradável desse material é levada para uma estufa (de plantas), que dispõe de 25 leitos de vermicompostagem, onde são misturados com esterco animal e resíduos de plantas para a vermicompostagem. Ao final de 60 dias é obtido o húmus. Vale ressaltar que esse húmus não é consumido pelo condomínio, mas sim, comercializado externamente.

Em Salem, Oregon, têm sido vermicompostadas desde de 1977, 20 toneladas por mês de resíduos de indústria de papel. Iniciou-se também em 1977, no Colorado, um trabalho de compostagem com três comunidades. A compostagem é realizada em duas fases, sendo a primeira em leiras de compostagem, utilizando-se a técnica do revolvimento, que dura aproximadamente 4 semanas. A segunda é caracterizada pela humificação obtida através da vermicompostagem.

Em San José, Califórnia, a vermicompostagem vem sendo desenvolvida desde 1974. Essa cidade é de grande porte e produz uma quantidade média de 30.000 toneladas de lodo de esgoto seco por ano, de digestores anaeróbios. Esse lodo, após a secagem, é colocado em leiras e inoculado com 1200 g de minhocas por metro cúbico. Terminada a fase de vermicompostagem da leira, as minhocas são removidas para serem utilizadas na próxima leira e o composto é retirado e comercializado.

EDWARDS et al. (1984) apresentam os resultados da aplicação da vermicompostagem em diversos resíduos rurais: estrume de gado, de porcos, de cavalos, de patos, de frangos, de peru e resíduos de batata. Uma grande gama de verduras e legumes se desenvolveram melhor nos vermicompostos obtidos do que em materiais comerciais para este fim. Além disso as minhocas foram aproveitadas para a alimentação de peixes e frangos pelo seu valor nutritivo (7 a 10% em peso de proteínas, especialmente lisina; 8 a 20% de carboidratos, 2 a 3% de minerais e uma grande diversidade de vitaminas).

Esse projeto teve a colaboração de grande número de estações experimentais, universidades e organizações comerciais e mostraram que as minhocas, especialmente a *Eisenia foetida* pode degradar resíduos orgânicos a materiais mais simples, ricos em disponibilidades de nutrientes e com uma melhor capacidade de troca e maior porosidade, o que dá ao vermicomposto um enorme potencial para a aplicação na horticultura.

HARRIS et al. (1990) relatam uma experiência em que se vêm obtendo excelentes resultados. Trata-se da vermicompostagem de lodo de tratamento de esgoto de Fallbrook, uma comunidade rural de 16.000 habitantes, na Califórnia - EUA.

A produção diária de lodo seco era de 0,6 toneladas, sendo 50% desse material vermicompostado. A compostagem é realizada em duas fases, sendo a primeira convencional, em leiras de compostagem, para que a temperatura seja

elevada, garantindo assim a redução de microrganismos patogênicos, e a segunda fase pela vermicompostagem.

O lodo proveniente da estação de tratamento de esgoto, que contém de 1 a 1,3% de sólidos, é disposto em leitos de secagem, por um período de 30 a 60 dias, dependendo da época do ano, até atingir 15 a 18% de sólidos. É então misturado com palha para aumentar a porosidade do meio e transferido para as leiras de compostagem, onde permanece por cerca de 30 dias.

Depois desse processo, esse material é peneirado e misturado novamente com palha para ser transferido para os leitos de vermicompostagem, sendo inoculado com cerca de 1600 g de minhocas por metro cúbico de composto.

Essa transferência se dá gradualmente, tornando o processo praticamente contínuo. As minhocas são aclimatadas por 30 dias e o restante do material a ser vermicompostado é colocado semanalmente em camadas de 15 cm até atingir uma espessura de aproximadamente um metro.

Quando se atinge a espessura de um metro, já decorreram cerca de 6 meses. Nesse momento as minhocas se concentram nos primeiros 15 a 20 cm e o restante da altura é constituído pelo vermicomposto.

O vermicomposto retirado é peneirado e estocado por 30 dias para cura e secagem, estando então pronto para a utilização.

Estudos realizados com esse composto indicaram um aumento nas concentrações de nitrogênio no vermicomposto em relação ao composto das leiras, embora se tenham reduzido as concentrações de fósforo e potássio. Entretanto, o nutriente geralmente limitante nas culturas agrícolas é o nitrogênio. Verificou-se também a bioacumulação de metais pesados nas minhocas, reduzindo assim sua concentração no vermicomposto, apontando a possibilidade de utilização desse processo para tratamento de resíduos que necessitem de redução da concentração de metais.

BIDONE (1995) desenvolveu experimentos de vermicompostagem com a utilização de resíduos sólidos de curtume com alta concentração do metal cromo, consorciado com composto de lixo orgânico urbano como suplementação alimentar às minhocas. Os resultados mostraram uma atenuação do cromo, interferindo na sua mobilidade.

BARBOSA (1996), aproveitando o vermicomposto resultante dos experimentos de BIDONE (1995), pesquisou o potencial desse material para o condicionamento do solo através do estudo dos processos de absorção, acumulação e translocação do cromo em culturas de feijoeiro, rabanete e rúcula. Os resultados mostraram que as plantas absorvem cromo do vermicomposto, acumulando-o principalmente nas raízes, embora tenha ocorrido alguma translocação para as partes aéreas.

3.4. Requisitos para o desenvolvimento da vermicompostagem

Muitos autores têm apresentado diversos requisitos básicos para o desenvolvimento da vermicompostagem. Alguns desses requisitos diferem ligeiramente de autor para autor, principalmente em função de particularidades das pesquisas e experiências por eles desenvolvidas.

BRADY (1983) aponta uma série de 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 conseqüência, prosperam onde se faz adição ao solo de estrume animal ou resíduos de culturas. A maioria das espécies se desenvolve melhor em solo com pouca acidez. Aparentemente, a nutrição de certas minhocas depende

também de algumas glândulas secretoras de calcário e essas espécies, portanto, exigem elevado nível de cálcio trocável para apresentarem um bom desempenho.

HARTENSTEIN* apud APPELHOF (1981) realizou estudos com a minhoca vermelha (*Eisenia foetida*) por mais de quatro anos e apresenta os seguintes requisitos para o bom desempenho da vermicompostagem utilizando esta espécie de minhoca:

- temperatura entre 20 °C a 29 °C;
- umidade entre 70% a 85%;
- pH entre 5,5 e 8,5;
- as minhocas em geral têm preferência por esterco, como por exemplo o bovino, mas se alimentam de grande variedade de resíduos orgânicos, desde que sejam aeróbios. Se for utilizado lodo de processo anaeróbio, este deve ser devidamente condicionado (aerado), ou será tóxico para as minhocas;
- a massa máxima de minhocas que pode ser suportada em um dado volume de estrume misturado com solo é de aproximadamente 80 kg de minhoca (*Eisenia foetida*) por metro cúbico dessa mistura, isso se não houver distúrbios na cultura. Porém, se ocorrerem distúrbios na cultura que tragam estresse às minhocas, essa capacidade fica reduzida para 1/3 da capacidade citada.

A CETESB (1987) apresenta mais algumas recomendações para o bom desempenho da vermicompostagem. Recomenda que os resíduos sejam bem triturados para permitir sua rápida ingestão pelas minhocas e bem homogêneos, pois o revolvimento durante a vermicompostagem é realizado exclusivamente pelas minhocas.

* HARTENSTEIN, R. **The use of *Eisenia foetida* in organic matter cycles: laboratory scale.** s.n.t.

Os canteiros para a vermicompostagem devem ter pequena altura, (aproximadamente 30 cm), para não compactarem e assim permitirem uma boa aeração. Recomenda-se a proteção dos canteiros de vermicompostagem contra o excesso de água de chuva, que pode encharcar o meio dificultando a sua aeração, assim como a proteção contra a insolação direta, tão prejudicial a esses organismos. Também é ressaltada a necessidade de acompanhamento e controle do aparecimento de possíveis predadores naturais, como as centopéias, sanguessugas terrestres e formigas.

3.5. Características das minhocas e a escolha da espécie mais adequada

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 auto fecundação. A maioria das espécies vivem preferencialmente em ambientes ricos em materiais orgânicos em decomposição.

Quando a minhoca é colocada em um meio que lhes “agrada”, pode-se observar que estas fazem um reconhecimento da superfície, através de um alongamento e encurtamento transmitidos ao longo do corpo, até que o espécime penetre no meio e desapareça. Quando o meio não lhe favorece, ela faz um rápido reconhecimento e não penetra no meio. É um organismo aeróbio, encontrado geralmente na camada superior de solos húmicos. Há um número grande de gêneros e espécies, cada qual com características específicas. Uma das espécies mais estudadas e utilizadas na vermicompostagem é a *Eisenia foetida*. Embora viva em matéria orgânica em decomposição (quando esta existe), tem condições de canalizar em solo

arenoso e preenchê-lo paulatinamente com matéria orgânica, além de utilizar grande diversidade de matéria orgânica como substrato (KNÄPPER, 1990).

A escolha da minhoca a ser utilizada para a vermicompostagem depende de uma série de fatores. SATCHELL* apud APPELHOF (1981) lista alguns fatores que orientam esta escolha, como a umidade do meio, o intervalo de temperatura, a natureza do resíduo e o grau de insolação. Segundo ele, algumas espécies de minhocas podem ser mais aquáticas do que a *Eisenia foetida* e outras que vêm sendo utilizadas atualmente. Há espécies que crescem e proliferam mais rapidamente. Outras têm diferentes tolerâncias de pH, de fenóis e outras características do substrato. Como exemplo de minhoca alternativa, tem-se a espécie africana, a *Alma emini* que vive em locais alagadiços, freqüentemente na ausência de oxigênio livre. Ela possui um sistema de armazenamento de ar em seu organismo que permite a sua permanência em ambiente anaeróbio.

Pelo exposto, pode-se concluir que há ainda uma gama muito grande de estudos das potencialidades de cada espécie no tratamento de resíduos sólidos. Atualmente, segundo a bibliografia disponível, a minhoca mais utilizada nos tratamentos de resíduos sólidos é a *Eisenia foetida*, e conseqüentemente sobre a qual se dispõe de mais informações. Essa realidade talvez possa ser modificada no futuro, através de estudos e utilização de outras espécies com características diferentes. As características biológicas das minhocas são muito bem descritas pela CETESB (1987) e por KNÄPPER (1984).

A seguir é apresentada uma síntese da anatomia e reprodução desses vermes, de acordo com estes dois autores.

A minhoca possui a boca localizada no 1º segmento, sendo recoberta por um pequeno lóbulo desse segmento chamado prostômio. O ânus se

* SATCHELL, J. Professor no "Institute of Terrestrial Ecology, Marlewood Research Station", em Cumbria, Inglaterra.

localiza no último segmento e apresenta a forma de uma fenda vertical. Em animais sexualmente maduros, alguns segmentos localizados na primeira terça parte espessam-se devido ao desenvolvimento de células especiais em suas paredes, formando um anel mais claro denominado clitelo.

Na superfície externa do corpo das minhocas, encontram-se vários orifícios: aberturas genitais femininas e masculinas, aberturas dos receptáculos seminais e poros dorsais.

Em cada segmento, com o auxílio de uma lupa, pode-se observar uma série de pequenos espinhos amarelos voltados para trás. Estas estruturas são as cerdas e desempenham importante papel na locomoção.

Em relação à anatomia interna, a minhoca possui um aparelho digestivo formado por um tubo que se estende desde a boca até o ânus e possui várias dilatações no seu trajeto, destacando-se: faringe, onde o alimento recebe uma espécie de saliva que contém muco para facilitar o deslocamento e enzima que ataca proteínas; moela, onde o alimento é triturado pela sua forte musculatura; intestino propriamente dito, onde ocorre a presença de vários fermentos digestivos, como protease, amilase, lipase, quitinase e celulase.

No processo de reprodução, a copulação inicia-se quando dois indivíduos colocam-se ventre a ventre em uma posição inversa, ocorrendo a transferência de espermatozoides de um ventre para o outro. Os ovos são postos em grupos, envolvidos por um casulo, semelhantes a pequenos fusos de coloração amarelada. O processo de formação do casulo inicia-se cerca de 48 horas após a copulação, pela produção de uma camada mucosa sobre o clitelo que, exposta ao ar, endurece gradativamente. O animal retrai-se para que este anel se desloque para adiante. No seu interior são depositados aproximadamente 20 óvulos pelo oviduto que se abre na região do próprio clitelo. Quando este anel passa pelas espermatecas, recebe os espermatozoides que fecundarão os óvulos. O interior do casulo é preenchido ainda por uma substância albuminóide, da qual se nutrem os embriões. Devido à elasticidade e

viscosidade do anel, ao libertar-se do corpo do verme, suas extremidades fecham-se e o casulo é depositado na terra. Em condições favoráveis, os ovos eclodem após aproximadamente 14 a 20 dias. De cada casulo, contendo em torno de 20 ovos, duas a três larvas se desenvolvem, em média.

A minhoca cresce rapidamente e a maturidade sexual é atingida após aproximadamente 30 dias de vida.

A quantidade de casulos produzidos em determinado período depende da espécie. No caso da *Eisenia foetida*, cada exemplar fornece um casulo a cada cinco dias, quando criada em cativeiro.

3.6. A qualidade do vermicomposto

Os estudos dos vermicompostos têm mostrado que o húmus assim obtido tem grande potencial como condicionador ou fertilizante orgânico de solo.

HARRIS et al. (1990) apresentam uma comparação de concentrações de nitrogênio, fósforo e potássio em lodo de esgoto compostado e vermicompostado. Neste último, há um aumento da concentração de nitrogênio, enquanto o fósforo e potássio é reduzido. Entretanto, o nutriente geralmente limitante nas culturas agrícolas é o nitrogênio. Segundo esses dados, a concentração de nitrato (NO_3^-) é de 4 a 10 vezes maior no vermicomposto do que no composto simples. Outra característica do vermicomposto é que ele aumenta a retenção de umidade no solo e também a porosidade, favorecendo a fixação natural de nitrogênio no solo.

De acordo com EDWARDS et al. (1984), um projeto iniciado em 1980 mostrou que as minhocas, especialmente a *Eisenia foetida*, quebram resíduos orgânicos em cadeias mais simples, ricos em nutrientes disponíveis, e com uma boa capacidade de retenção de umidade. Isso dá ao vermicomposto um elevado potencial para aplicação em horticultura.

Segundo ALBANELL et al. (1988), a vermicompostagem aumenta a capacidade de troca catiônica e, conseqüentemente, melhora a fertilidade do material vermicompostado pela maior retenção de nutrientes na forma trocável.

Segundo DINDAL (1978), as minhocas modificam o pH do material vermicompostado para níveis aproximadamente neutros.

3.7. As vantagens e os problemas da vermicompostagem

Entre as diversas vantagens que se podem destacar na aplicação da vermicompostagem para tratamento de resíduos sólidos orgânicos estão:

- a minhoca acelera a estabilização de muitos compostos orgânicos e produz um composto com propriedades melhores para o desenvolvimento vegetal;
- o excremento da minhoca é um excelente condicionador de solo, com alta capacidade de retenção de umidade e uma porosidade natural que favorece a fixação do nitrogênio no solo;
- a redução na concentração de metais, aparentemente pela bioacumulação desses nas minhocas, possibilitando o tratamento de resíduos que necessitem de redução nas concentrações de metais pesados (HARRIS, 1990);
- o composto orgânico é um produto auxiliar à obtenção da fertilidade química, pois além de fornecer macronutrientes, fornece também micronutrientes necessários ao solo agrícola;
- o composto participa na fertilidade física do solo por aglutiná-lo de forma a permitir uma boa aeração das raízes e por possibilitar uma melhor retenção de água (RAMEH, 1981);

- pode-se obter a vermicompostagem da maioria dos resíduos sólidos, desde que estes contenham matéria orgânica e possam ser tornados aeróbios (CETESB, 1987);

Entre algumas das dificuldades de aplicação e desenvolvimento da vermicompostagem, podem ser citadas as seguintes:

- a dificuldade de adaptação das minhocas para alguns lodos, que podem ser tóxicos a elas e inviabilizar assim o processo (FRANCE* apud FRANZ, 1978);
- a dificuldade de se conseguir a quantidade necessária de minhocas para dar partida em sistemas de tratamento por vermicompostagem em grande escala (CARMODY* apud FRANZ, 1978);
- o mercado para o vermicomposto é relativamente limitado e pode não cobrir os custos do processo e transporte, sendo o processo viável do ponto de vista de um tratamento mais barato e com um resíduo final (o vermicomposto) com melhor qualidade para a disposição ou utilização agrícola (McNELLI* apud FRANZ, 1978);
- a necessidade de grandes áreas (estimada em quatro vezes maior que para a compostagem aeróbia em leiras) para a vermicompostagem, não somente para o desenvolvimento da vermicompostagem propriamente dita como também para a adequação do resíduo às características necessárias para o desenvolvimento do processo como: umidade, estabilização inicial, aeração, etc.;
- quando é verificada a presença de microrganismos patogênicos, há a necessidade de um processo inicial de tratamento para a eliminação (ou redução) dos mesmos antes da aplicação da vermicompostagem. Neste

* FRANZ não apresenta a referência completa sobre PAUL FRANCE, FRANK CARMODY e JIM McNELLI. Eles são apenas citados por FRANZ em seu artigo.

processo não há redução significativa de patogênicos para torná-lo sanitariamente seguro;

- o tempo requerido para a vermicompostagem é aproximadamente duas vezes maior do que a compostagem aeróbia em leiras, apesar da qualidade do vermicomposto ser muito superior a este último (HARRIS, 1990).

3.8. O papel da minhoca no solo

As minhocas desempenham um papel importante nos solos. Segundo CETESB (1987), as minhocas participam da humificação da matéria orgânica, pelo consumo desse material transformando-o em excremento humificado e pela escavação de suas galerias. Segundo DINDAL (1978) as minhocas revolvem o solo, modificam seu pH para níveis aproximadamente neutros, homogeneizam o solo aumentando a capacidade de troca iônica, aumentam a retenção de umidade e facilitam a drenagem através das escavações.

BRADY (1983), que coloca a minhoca comum como o macroanimal mais importante do solo, com mais de 200 espécies conhecidas, cita várias razões de sua importância, como: a quantidade de solo processada por dentro do corpo dessas criaturas pode atingir anualmente até 370 quilogramas de terra por are (1 are = 100 m²); durante o processamento no trato intestinal, a matéria orgânica, como também os conteúdos minerais, são submetidos às enzimas digestivas e a um processo de trituração; os resíduos de minhoca num campo cultivado podem chegar a cerca de 190 quilogramas por are; comparado ao próprio solo, os resíduos contêm maiores quantidades de matéria orgânica, de nitrogênio total e sob a forma de nitratos, de cálcio e de magnésio trocáveis, de fósforo e de potássio assimiláveis, assim como maior capacidade de troca de cátions; maior crescimento de gramíneas junto aos resíduos de minhoca leva a admitir uma maior disponibilidade de nutrientes vegetais.

As minhocas são também importantes sob outros aspectos na fertilidade e produtividade do solo. Os condutos deixados na terra servem para aumentar a aeração e a drenagem, fatores preponderantes no desenvolvimento do solo. Além disso, as minhocas fazem transporte de quantidade considerável do solo subjacente para a superfície. Misturam também o solo e favorecem sua granulação, ao transportarem pelos orifícios quantidades de matéria orgânica não decomposta, tais como folhas e gramíneas que utilizam como alimento. Sem nenhuma dúvida, as minhocas aumentam tanto o tamanho quanto a estabilidade dos agregados do solo.

3.9. Considerações sobre a fertilidade do solo

O conceito de fertilidade do solo, de acordo com RAMEH (1981) tem sido longamente debatido, sendo que as tentativas de definições são mais ou menos empíricas e não apresentam uma caracterização clara e universal.

Os fatores de caráter pedológico, que concorrem para o desenvolvimento e produção de culturas, estão expressos nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

A fertilidade química baseia-se quase que exclusivamente na adubação com macronutrientes (N, P e K), com formulações variáveis de modo a corrigir a deficiência desses nutrientes no solo, em função da cultura existente ou a ser plantada.

Os adubos minerais, entretanto, não resolvem todos os problemas de fertilidade do solo, sendo de grande valor a presença de material orgânico (húmus) para que sejam melhoradas certas características do solo.

Os compostos orgânicos fornecem, além dos macronutrientes, os micronutrientes necessários ao desenvolvimento vegetal, ao passo que melhoram também as características físicas e biológicas do solo, como

porosidade, retenção de umidade, aumentando também a população microbiana deste, etc..

Ainda segundo RAMEH (1981), o teor ideal de matéria orgânica no solo é de 5%. Praticamente todos os solos brasileiros são carentes de matéria orgânica, apresentando níveis bem inferiores ao citado. Portanto é de grande utilidade a aplicação de compostos orgânicos nos solos brasileiros para a melhoria de sua fertilidade.

Vários resíduos orgânicos são citados por MIYASAKA et al. (1984) para disposição no solo com benefícios comprovados. São lodos de esgoto, resíduos industriais de óleos vegetais, vinhaça e torta de filtro da indústria açucareira alcooleira, resíduos de biodigestores, etc. A única ressalva feita à disposição desses resíduos no solo é quanto à presença de bactérias, vírus e metais pesados que podem causar sérios problemas à saúde pública e ao meio ambiente.

Segundo MELLO et al. (1983), muitos consideram como um solo fértil aquele que tem boas propriedades físicas e fornece às plantas os nutrientes que dele são absorvidos, em quantidades razoáveis e convenientemente balanceados. Esse solo não deve conter substâncias ou elementos tóxicos em quantidades que possam prejudicar o desenvolvimento dos vegetais e deve estar localizado numa zona climática na qual luz, temperatura, umidade, e outros fatores não sejam limitantes do crescimento vegetal.

De acordo com MALAVOLTA (1989), a fertilidade do solo está diretamente ligada à sua composição física, química e biológica. As características físicas são representadas principalmente pelo diâmetro das partículas e porosidade, que caracterizam os solos, desde os tipos argilosos, de difícil drenagem e aeração, até os solos arenosos que são extremamente permeáveis.

A composição biológica do solo é representada pelas bactérias que degradam a matéria orgânica transformando-a quimicamente, na maioria das

vezes em formas aproveitáveis para as plantas. A composição biológica dos solos não fica restrita apenas às bactérias, mas abrange outros seres, como por exemplo, os anelídeos que promovem aeração além de favorecer outros processos.

A composição química do solo, do ponto de vista da fertilidade pode ser dividida em 3 categorias:

a) elementos essenciais: são os elementos que participam da vida da planta e na sua ausência, ela não completa seu ciclo ou morre. Estes elementos podem ser divididos em 3 grupos:

- substâncias minerais básicas: CO_2 , H_2O e O_2 ;
- macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S;
- micronutrientes: Cu, B, Cl, Fe, Mn, Zn.

b) elementos úteis: são aqueles que não são essenciais, mas melhoram o desenvolvimento da planta. Ex. Na, Si, etc.

c) elementos tóxicos: na sua presença a planta tem o seu desenvolvimento prejudicado chegando até a morte. Ex.: Al, micronutrientes em concentrações elevadas, etc.

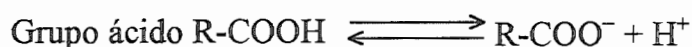
BRADY (1983) lembra que argila e húmus são a base da atividade do solo. Ambos existem em “estado coloidal”, em que as partículas específicas são caracterizadas por tamanhos extremamente pequenos, grande área externa por unidade de peso e presença de cargas de superfície que atraem íons e água.

As propriedades físicas e químicas dos solos são reguladas principalmente pela argila e húmus, que são centros de atividades, em cujo redor ocorrem reações químicas e trocas de substâncias nutritivas. Além disso, graças à atração de íons para suas superfícies, protegem temporariamente as substâncias nutritivas essenciais contra a lixiviação e as liberam então lentamente para a utilização pelas plantas.

Comparando-se a argila e o húmus, este último apresenta maior capacidade nutritiva e de retenção de água. Além disso, o húmus possui uma

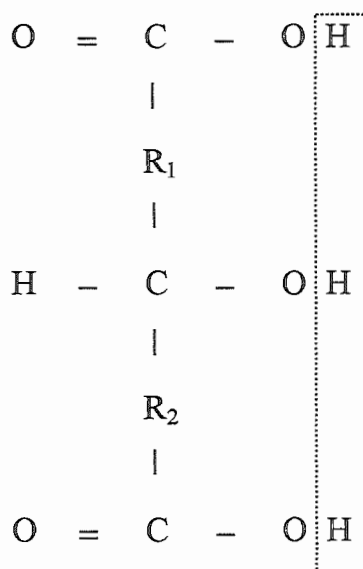
vigorosa população de organismos do solo a ele associada, exercendo extensivo controle sobre a redução da matéria orgânica, inclusive dele próprio, regulando o suprimento dos diversos elementos nutrientes.

De acordo com MELLO et al. (1983), a matéria orgânica humificada tem elevado poder de adsorção de cátions devido, principalmente, à dissociação de H^+ de grupos ácidos e fenólicos:

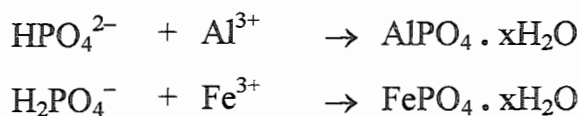


Os radicais negativos R-COO^- e R-O^- são capazes de reter íons eletropositivos em forma trocável.

KIEHL (1985) lembra que os radicais carboxílicos ($-\text{COOH}$) e hidroxílicos ($-\text{OH}$) presentes na matéria orgânica são responsáveis pelos complexos de quelação. A fórmula estrutural exemplificada é de um quelato e os hidrogênios separados dos carboxilos e hidroxilos pela linha pontilhada são os que podem ser substituídos pelo ferro trivalente (Fe^{3+}), ferro bivalente (Fe^{2+}), alumínio (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e manganês (Mn^{2+}):



A presença de complexos quelados não permite a fixação do fosfato solúvel, como mostram as equações seguintes que apresentam a transformação de fosfatos solúveis e assimiláveis em fosfatos insolúveis e não assimiláveis pelas plantas:



3.9.1. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica é um dos principais indicadores da fertilidade do solo. De acordo com KIEHL (1985), a CTC representa a habilidade dos colóides (húmus e argila) de adsorverem cátions como potássio, cálcio, magnésio e alumínio existentes na solução do solo, podendo depois cedê-los às raízes das plantas. Um solo com baixa CTC não consegue reter esses nutrientes, mesmo que sejam adicionados ao solo. Entretanto os metais “traços”, que podem ser tóxicos em maiores quantidades, têm alta força de ligação com os sítios de troca do colóide, tendo uma alta seletividade por um sítio de troca (10 a 10³ vezes maior que os íons Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺).

O húmus apresenta uma elevada capacidade de troca catiônica se comparado com os colóides inorgânicos do solo; a capacidade de troca do húmus é cerca de 30 vezes maior do que a da caulinita (um tipo de argila).

A capacidade de troca catiônica da matéria orgânica tem sua origem nas cargas negativas oriundas dos grupos carboxílicos e fenólicos. Estes grupos apresentam um átomo de hidrogênio dissociável ligado ao oxigênio. A dissociação do hidrogênio libera cargas negativas no húmus, as quais podem ser ocupadas por outros cátions como o cálcio, o magnésio e o potássio

conforme mostrado no item 3.9. O grau de dissociação depende do pH do meio.

3.9.2. Efeitos do potencial hidrogeniônico (pH) na fertilidade do solo

De acordo com MALAVOLTA (1989), o valor do pH é o principal responsável pela forma em que são encontrados os diversos elementos químicos no solo (macronutrientes, micronutrientes e demais elementos), estando ligado diretamente à absorção desses elementos pelas plantas. Níveis altos do pH provocam a precipitação dos metais na forma Metal-OH, geralmente anulando a toxicidade dos metais “traço”, quando presentes em excesso. O pH na faixa de 4 a 5 proporciona uma melhor absorção de cálcio. A absorção de fósforo e nitrogênio também depende do pH. No caso do fósforo, para pH entre 4 e 8, este se apresenta na forma de H_2PO_4^- que é mais facilmente absorvido pela planta. Já para níveis de pH acima de 8,7, o fósforo se apresenta na forma de HPO_4^{2-} apresentando maior dificuldade de absorção.

O nitrogênio se apresenta predominantemente sob a forma de NO_3^- para pH entre 6 e 6,5. Em pH mais ácido, o nitrogênio se apresenta predominantemente sob a forma de NH_4^+ , sendo absorvido apenas por um pequeno número de espécies que possuem mecanismos para absorção e transformação deste composto, como o eucalipto e o pinus.

As indicações tidas como ideais de pH situam-se na faixa de 6 a 6,5, que favorecem a absorção da maioria dos nutrientes. Para valores menores de pH (< 3,5) já ocorrem alterações na permeabilidade das membranas devido à presença de H^+ . Para valores de pH acima de 8, já começa a ocorrer deficiência nutricional devido principalmente à complexação e precipitação de metais. A Figura 1 mostra a variação na disponibilidade de alguns elementos em função do pH.

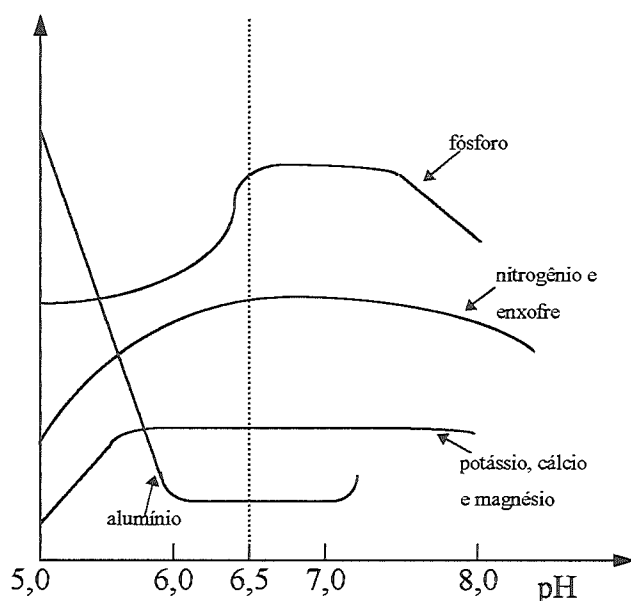


Figura 1 - Relação entre pH e disponibilidade de elementos no solo

Fonte: MALAVOLTA (1989)

3.10. Formas encontradas, funções e efeitos dos macronutrientes e do alumínio nas plantas.

As Tabelas 1 e 2, adaptadas de MALAVOLTA (1989) resumem respectivamente as principais funções dos macros nutrientes na vida da planta e as implicações dessas funções no processo mais geral da formação da colheita.

Tabela 1 - Funções dos macronutrientes.

Elemento	Estrutural	Constituinte ou ativador de enzimas	Processos
Nitrogênio	Aminoácidos e proteínas; bases nitrogenadas e ácidos nucléicos; enzimas e coenzimas; vitaminas; glico e lipoproteínas; pigmentos e produtos secundários.	Constituinte de todas as enzimas.	Absorção iônica; fotossíntese; respiração; sínteses; multiplicação e diferenciação celulares; herança.
Fósforo	Ésteres de carboidratos; fosfolipídeos; coenzimas; ácidos nucléicos.	Constituinte de todas as enzimas.	Os mesmos do nitrogênio e armazenamento e transferência de energia; fixação simbiótica de nitrogênio.
Potássio	Predominantemente em forma iônica.	Quinase pirúvica; sintetase do glutathione, do amido, de succinil CoA, de glutamilsteína; de NAD ⁺ e de formil tetrahydrofolato; desidratase de treonina; aldolase de frutosedifosfato; desidrogenase de aldeído.	Propriedades osmóticas; abertura e fechamento dos estômatos; fotossíntese; transporte de carboidratos e outros produtos; respiração; sínteses; fixação simbiótica do nitrogênio.
Cálcio	Pectato (lamela média); carbonato; oxalato; fitato; calmodulinas.	ATPase (apirase); alfa amilase; fosfolipase D; nucleases.	Estrutura e funcionamento de membranas; absorção iônica; reações com hormônios vegetais; e ativação enzimática.
Magnésio	Clorofilas.	Tioquinase acética; quinase pirúvica; hexoquinase; enolase.	Absorção iônica; fotossíntese; respiração; armazenamento e transferência de energia; sínteses orgânicas; balanço eletrolítico; estabilidade dos ribossomas.

Fonte: MALAVOLTA (1989)

Tabela 2 - Participação dos macronutrientes na formação e na qualidade da colheita.

Elemento	Papéis
Nitrogênio	Estimula a formação e desenvolvimento de gemas floríferas e frutíferas; maior vegetação e perfilhamento; aumento do teor de proteína.
Fósforo	Acelera formação de raízes; aumenta a frutificação; apressa a maturação dos frutos; aumenta o teor de carboidratos, óleos, gorduras e proteínas; ajuda a fixação simbiótica de nitrogênio.
Potássio	Estimula vegetação e perfilhamento (gramíneas); aumenta o teor de carboidratos, óleos, gorduras e proteínas; estimula o enchimento de grãos, diminuindo chocamento; promove armazenamento de açúcar e amido; ajuda a fixação simbiótica de nitrogênio; aumenta a utilização de água; aumenta a resistência a secas, geadas, pragas e moléstias.
Cálcio	Estimula o desenvolvimento das raízes; aumenta a resistência a pragas e moléstias; auxilia a fixação simbiótica de nitrogênio; maior pegamento das floradas.
Magnésio	Colabora com o fósforo.

Fonte: MALAVOLTA (1989)

3.10.1. Nitrogênio

Segundo KIEHL (1985), não há outra maneira de se armazenar nitrogênio no solo, a não ser na forma orgânica. As formas minerais, amoniacal (NH_4^+) e nítrica (NO_3^-) estão sujeitas a perdas por volatilização ou por lavagem, respectivamente. Portanto, o nitrogênio é um mineral efêmero no solo, pois logo é absorvido, lavado ou perdido para a atmosfera por desnitrificação. Na matéria orgânica, esse inconveniente é menos pronunciado por não sofrer rápida lavagem, como acontece com as formas minerais.

Nas colheitas agrícolas, o nitrogênio é o principal limitador e é encontrado na matéria orgânica presente no solo predominantemente na forma de proteínas, além de estar presente nas nucleoproteínas, nos aminoácidos, nos polipeptídeos, nas enzimas e em outros compostos em pequenas quantidades. Fora as pequenas quantidades de nitrogênio mineral, 90 a 99% do nitrogênio total está na forma orgânica.

O nitrogênio regula a velocidade de decomposição e a atividade microbiana. Se a matéria orgânica ativa e capaz de estimular a atividade microbiana contiver menos de 1,2% de nitrogênio e uma relação carbono/nitrogênio alta, pode-se esperar que a imobilização do nitrogênio mineral do solo será maior que a mineralização, e o processo de decomposição será lento; quando o nitrogênio é insuficiente, os microrganismos usam o nitrato ou o amônio do solo para formar proteínas e conseqüentemente a produção de húmus será menor.

MELLO et al. (1983) expõem que as principais formas de nitrogênio disponíveis às plantas são as formas nítrica e amoniacal e que ambas têm parcela sempre pequena no solo (em torno de 5%), ficando os vegetais na dependência da transformação do nitrogênio orgânico para as formas minerais disponíveis.

Ainda, segundo MELLO et al. (1983) e também KIEHL (1985), não são realizadas atualmente, de forma rotineira, análises químicas para a determinação do nitrogênio em sua forma disponível para os vegetais. Isso se deve à enorme variabilidade de sua concentração nessa forma, que sofre influência principalmente da temperatura e umidade.

3.10.2. Fósforo

BRADY (1983) afirma que nenhum outro elemento, com a possível exceção do nitrogênio, faz tanta falta ao crescimento vegetal quanto o fósforo. A ausência deste elemento poderá impedir a assimilação de outros nutrientes pelos vegetais. O fósforo assume ainda uma importância maior se for considerado o fato da maioria de suas formas existentes nos solos serem inassimiláveis pelos vegetais. Segundo MALAVOLTA (1989), o fósforo disponível para a absorção pelas raízes das plantas se encontra na forma de íons fosfatos livres em solução no solo. As demais formas de fósforo encontradas têm baixa solubilidade, impedindo a sua absorção pelas plantas.

De acordo com KIEHL (1985), a matéria orgânica é uma importante fonte de fósforo para as plantas, contendo geralmente de 15 a 80% do fósforo total encontrado no solo. A maior quantidade de fósforo orgânico está contida na fitina e seus derivados. Outras substâncias orgânicas que contêm fósforo são as nucleoproteínas, compostos de ácido nucléico (polinucleotídeos) com proteínas, encontrados tanto nos tecidos animais como vegetais e nos produtos da decomposição desses organismos.

3.10.2. Potássio

Segundo KIEHL (1985), enquanto que mais da metade do fósforo encontrado na superfície do solo está na matéria orgânica e quase todo o nitrogênio em combinações orgânicas, somente uma pequena porção do potássio está nela contida. O potássio não participa de combinações orgânicas na planta. É um elemento ativo em forma livre, sendo por isso prontamente liberado para o solo quando restos vegetais e animais são a ele incorporados. O potássio é absorvido pelas raízes na forma iônica (K^+).

De acordo com MELLO et al. (1983), a matéria orgânica humificada, principalmente se associada à argila no complexo argila-húmus, concorre para reter K na forma trocável contra perdas por lavagem.

3.10.2. Cálcio

MELLO et al. (1983) afirmam que o cálcio é um elemento de ocorrência generalizada na natureza. Nos solos neutros ou próximos da neutralidade, o cálcio é o cátion que predomina quantitativamente entre as bases trocáveis. Mesmo em solos ácidos, a disponibilidade de cálcio é alta e desempenha papel importante no controle do pH. Contudo, ele é lavado em grandes quantidades pelas águas de percolação e substituído principalmente por H^+ .

As formas principais de incidência de cálcio no solo ocorrem: em minerais primários, especialmente os silicatos; como carbonato de cálcio, normalmente uma das fontes mais importante de cálcio; como sulfato de cálcio ou gesso e como cálcio trocável, constituído pelos íons Ca^+ adsorvidos aos colóides do solo. Quantidades variáveis de cálcio ocorrem ainda, como parte integrante da matéria orgânica do solo, seja nos resíduos recém incorporados, seja no húmus, seja na matéria orgânica em decomposição.

O cálcio é absorvido pelas plantas na forma iônica, Ca^+ , principalmente da solução do solo.

3.10.2. Magnésio

Assim como o potássio e o cálcio, boa parte do magnésio fornecido às plantas provém de minerais do solo, coloca KIEHL (1985). A matéria orgânica, todavia, oferece valiosa contribuição no fornecimento de magnésio, pois elevados teores em húmus no solo garantem o suprimento desse nutriente às raízes. Os colóides inorgânicos e orgânicos do solo adsorvem eletrostaticamente o magnésio, retendo-o em uma forma trocável, disponível às plantas, exercendo o importante papel de evitar perdas por lavagens.

A forma mais encontrada de magnésio no solo, segundo MELLO et al. (1983), é combinado nos silicatos. Aparece em alguns carbonatos e também como constituinte da rede cristalina de algumas argilas e na matéria orgânica. Ocorre ainda como o íon Mg^{2+} adsorvido à fração coloidal (Mg trocável), numa proporção que varia geralmente entre 5 e 10% do teor total.

3.10.2. Alumínio

De acordo com MELLO et al. (1983), o alumínio é um dos principais constituintes do solo, sendo o principal responsável pela acidez dos solos tropicais.

Com relação às plantas, existem algumas evidências de que baixos níveis de alumínio podem ter efeito benéfico no crescimento de plantas, embora seu mecanismo não seja conhecido.

Segundo MALAVOLTA (1989), em geral o conteúdo de alumínio é muito maior nas raízes do que em outras partes das plantas, onde é fixado nos espaços livres.

O alumínio pode ser encontrado no solo ligado a minerais de argila, complexado em compostos solúveis da matéria orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) ou encontrado em outras soluções como Al(OH)_2^+ , AlSO_4^+ , etc.

O alumínio é responsável pela redução na solubilização do fósforo, que forma compostos estáveis, fixando-o, sendo este seu principal prejuízo às plantas. Também possui maior afinidade para ligação com colóides, deslocando o potássio, o cálcio, o magnésio e o nitrogênio na forma de NH_4^+ , aumentando a chance de lixiviação destes.

A absorção do alumínio pode se dar sob a forma de Al_3^+ , presente em soluções no solo, sendo nesta forma tóxico à planta. Nas outras formas ele causa poucos danos à planta.

Os efeitos fitotóxicos são observados principalmente nas raízes das plantas, sendo este o local de maior acúmulo, servindo como um filtro que impede a subida do alumínio até a parte aérea da planta. O alumínio presente na parte aérea encontra-se na forma neutra.

Os efeitos fitotóxicos do alumínio podem ser divididos em três formas principais:

- toxicidade direta: o alumínio causa efeitos negativos na integridade e na função da membrana plasmática. Pode ser encontrado ligado às proteínas ou aos fosfolipídeos das mesmas. Afeta o fluxo de K^+ e também dos carregadores da membrana através da inibição causada pelo alumínio nas atividades de ATPase do Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ ;
- toxicidade indireta: causa desbalanço interno na célula afetando o funcionamento das organelas do citoplasma causando inibição da divisão celular e inibição do crescimento. Origina também um desarranjo metabólico, alterando a fotossíntese, respiração e atividade enzimática.

- toxicidade secundária: causa antagonismo para os nutrientes P, K, Ca e Mg, gerando deficiência nutricional.

Os sintomas de toxidez por alumínio podem ser notados, segundo MALAVOLTA (1989), na formação de raízes curtas, grossas e pardas; na diminuição do crescimento da parte aérea da planta e na ocorrência de células binucleadas nas pontas das raízes. Pode-se verificar também interferência na produção de DNA e ATP e a redução da absorção e do transporte de fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

3.11. Níveis adequados dos macronutrientes e de alumínio para o desenvolvimento das plantas.

MELLO et al. (1983) citam os teores disponíveis de fósforo, potássio, cálcio e magnésio adequados do ponto de vista da fertilidade dos solos. A Tabela 3 mostra esses teores segundo pesquisas realizadas no estado de São Paulo.

Tabela 3 - Teores de alguns elementos, classificados sob o aspecto da fertilidade dos solos no estado de São Paulo.

Elemento	Teores (concentração)	Interpretação
Fósforo* $\mu\text{g/ml}$ de solo	0 a 3	muito baixo
	4 a 7	baixo
	8 a 15	médio
	16 a 30	alto
	> 31	muito alto
Potássio* $\mu\text{g/ml}$ de solo	0 a 30	muito baixo
	31 a 60	baixo
	61 a 100	médio
	101 a 200	alto
	> 201	muito alto
Cálcio** meq/100ml de solo	< 2,0	baixo
	2,0 a 4,0	médio
	> 4,0	alto
Magnésio** meq/100 ml de solo	< 0,4	baixo
	0,4 a 0,8	médio
	> 0,8	alto
Alumínio** meq/100 ml de solo	< 0,30	baixo
	0,30 a 0,60	médio
	> 0,70	alto (nocivo)

* RAIJ¹, apud MELLO et al. (1983).

** CATANI e JACINTO² apud MELLO et al. (1983).

Fonte: adaptado de MELLO et al. (1983).

¹RAIJ, B.V. *Interpretação de análise de terra*. Campinas, 1975, 8p.

/Mimeografado/

²CATANI, R.A. e JACINTO, A.O. Análise química para avaliar a fertilidade do solo. *Boletim técnico-científico nº 3*. Esc. Sup. de Agric. "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1974.

3.12. Alterações provocadas nas plantas por deficiências ou excessos minerais.

MALAVOLTA (1989) apresenta uma descrição detalhada dos sintomas de deficiências e excessos minerais, assim como algumas de suas consequências para o vegetal. Os sintomas de carência dos elementos de maior mobilidade são apresentados predominantemente nas estruturas (geralmente folhas) mais velhas, enquanto que no caso dos elementos de menor mobilidade os sintomas de deficiência são percebidos nas estruturas em formação (geralmente em folhas novas). Já os sintomas de excesso para alguns elementos são caracterizados pelos sintomas de falta de algum outro. Isto se dá geralmente pela competição por sítios de absorção desses elementos nas raízes das plantas. A seguir são descritos alguns dos sintomas de carências e de excessos minerais para os elementos: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e alumínio:

Nitrogênio

Sintomas de deficiência:

a) Visíveis

- Folhas amareladas, inicialmente as mais velhas, como resultado da proteólise.
- Ângulo agudo ente caule e folhas.
- Dormência de gemas laterais.
- Senescência precoce.
- Folhas menores devido ao menor número de células.

b) Químicos

- Baixo teor de clorofila.
- Produção de outros pigmentos algumas vezes.

c) Crescimento

- Em geral diminuindo, com possível aumento no comprimento das raízes em alguns casos.

d) Citológicos

- Pequenos núcleos e cloroplastos.

e) Metabólicos

- Redução na síntese de proteínas.
- Alto conteúdo de açúcares e alta pressão osmótica.

Sintomas de excesso:

- Em geral não identificados; pode haver aumento da fase vegetativa, atraso na maturação e redução dos frutos e sementes.

Fósforo

Sintomas de deficiência:

a) Visíveis

- Cor amarelada das folhas, a princípio das mais velhas, pouco brilho, cor verde azulada ou manchas pardas.
- Gemas laterais dormentes.
- Número reduzido de frutos e sementes.
- Atraso no florescimento.

b) Químicos

- Aumento de pigmentos vermelhos ou roxos em algumas espécies.
- Aumento no conteúdo de carboidratos.
- Aumento na relação P orgânico/P inorgânico.

c) Anatômicos

- Restrição na diferenciação dos caules.

Sintomas de excesso

- Não reconhecidos diretamente: pode haver deficiência de micronutrientes (metais pesados Cu, Fe, Mn, Zn).

Potássio

Sintomas de deficiência:

a) Visíveis

- Clorose e depois necrose das margens e pontas das folhas, inicialmente das mais velhas.
- Menor tamanho de frutos (laranja).
- Deficiência de ferro induzida (acúmulos de ferro nos nós inferiores).

b) Anatômicos

- Diferenciação prejudicada dos tecidos condutores.
- Perda da atividade cambial.

c) Químicos

- Aumento nas frações de nitrogênio alfa amínico e amídico.
- Aumento no conteúdo de ácidos orgânicos.
- Menor teor de açúcar e amido em órgãos de reserva.

Sintomas de excesso

- Deficiência de magnésio induzida.

Cálcio

Sintomas de deficiência:

a) Visíveis

- Amarelecimento de uma região limitada da margem das folhas mais novas.

- Crescimento não uniforme de folha, do qual resultam formas tortas, às vezes com um gancho na ponta.
- Murchamento e morte de gemas terminais.
- Gemas laterais dormentes.
- Deformação de tubérculos acompanhada de desintegração interna.
- Manchas necróticas internervais.
- Murchamento das folhas.
- As raízes mostram a deficiência precocemente: aparência gelatinosa das pontas e pêlos inchados.
- Pequena frutificação ou produção de frutos anormais.
- Produção pequena ou nula de sementes, mesmo com flores normais (em cereais).
- Menor nodulação nas leguminosas.

b) Anatômicos e histológicos

- Mitocôndrias menores e com menos proteína.
- As células radiculares não se diferenciam.
- Dificuldades para a mitose.

Sintomas de excesso

- Não conhecidos, possível deficiência de potássio e magnésio.

Magnésio

Sintomas de deficiência:

a) Visíveis

- Clorose nas folhas, usualmente começando e sendo mais severa nas mais velhas: clorose internerval, às vezes necrose; em algumas espécies a clorose é seguida pelo desenvolvimento de cor alaranjada,

vermelha ou roxa; o padrão de clorose reflete a distribuição de magnésio no tecido.

b) Anatômicos

- Numerosos cloroplastos pequenos.

c) Químicos

- “Carregador” de fósforo ou simplesmente uma consequência do papel do magnésio em sistemas enzimáticos implicados no metabolismo do fósforo; menor teor de clorofila.

Sintomas de excesso

- Não identificados; possível carência de potássio e cálcio.

Alumínio

Sintomas de excesso:

a) Visíveis

- Diminuição no crescimento das raízes; raízes engrossadas e pouco ramificadas.
- Folhas podem mostrar sintomas de falta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio.

b) Citológicos

- Deformação da parede celular.
- Células radiculares com dois núcleos.

c) Químicos

- Exaltação na atividade de oxidase do ácido indolacético.
- Acúmulo de fósforo inorgânico (menor fosforilação).

4. METODOLOGIA

4.1. Considerações gerais

O trabalho foi desenvolvido em uma área coberta denominada Estação Experimental, no Departamento de Hidráulica e Saneamento - SHS, no campus da USP de São Carlos - SP.

A vermicompostagem foi realizada em caixas de madeira de tamanho padronizado, utilizando-se como substrato um lodo do tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos misturado com solo em diversas proporções.

A minhoca escolhida para o experimento foi a minhoca vermelha da Califórnia - a *Eisenia foetida*. A fase de vermicompostagem teve uma duração de 75 dias contados a partir da inoculação.

Durante o experimento foram avaliadas a adaptação das minhocas nesse substrato e a qualidade do composto resultante como condicionador de solo.

Após o término da vermicompostagem, o composto foi utilizado para o plantio experimental de rabanetes com o objetivo de comparar a produtividade deste com as indicações de fertilidade do composto, obtidas através de análises químicas.

Na seqüência é detalhada toda a metodologia empregada.

4.2. O lodo utilizado como substrato

O lodo utilizado é proveniente do tratamento de águas residuárias do processamento de sucos cítricos, principalmente laranja, da indústria CITROSUCO PAULISTA S/A, localizada na cidade de Matão - SP.

Essa indústria possui duas linhas de tratamento de águas residuárias. Uma destas linhas é constituída pelo sistema de lodos ativados. A outra linha de tratamento é composta pelos sistemas de lagoas de estabilização e biodigestor U.A.S.B..

Existem portanto dois tipos de lodos gerados durante o processo de tratamento das águas residuárias: um aeróbio, proveniente do sistema de lodos ativados e os demais anaeróbios, provenientes do biodigestor e das lagoas de estabilização.

Neste trabalho foi utilizado o lodo sedimentado proveniente da lagoa número 6 do sistema biodigestor/lagoas de estabilização.

O fluxograma apresentado na Figura 2 mostra esse sistema de tratamento aplicado nessa indústria. As Figuras 3 a 7 ilustram respectivamente: o biodigestor U.A.S.B., a lagoa anaeróbia, as lagoas aeradas, as lagoas de maturação e o lodo sedimentado na lagoa de maturação já drenada, o qual foi utilizado nos experimentos.

O lodo destinado à vermicompostagem foi retirado durante a dragagem da lagoa, logo após a drenagem da mesma. Sua consistência apresentava-se de forma pastosa, muito semelhante à da argila. Logo abaixo da superfície exposta ao ar, apresentava uma cor escura. Após entrar em contato com o ar ele passava por um processo de oxidação, adquirindo uma tonalidade marrom. Também era praticamente isento de odor.

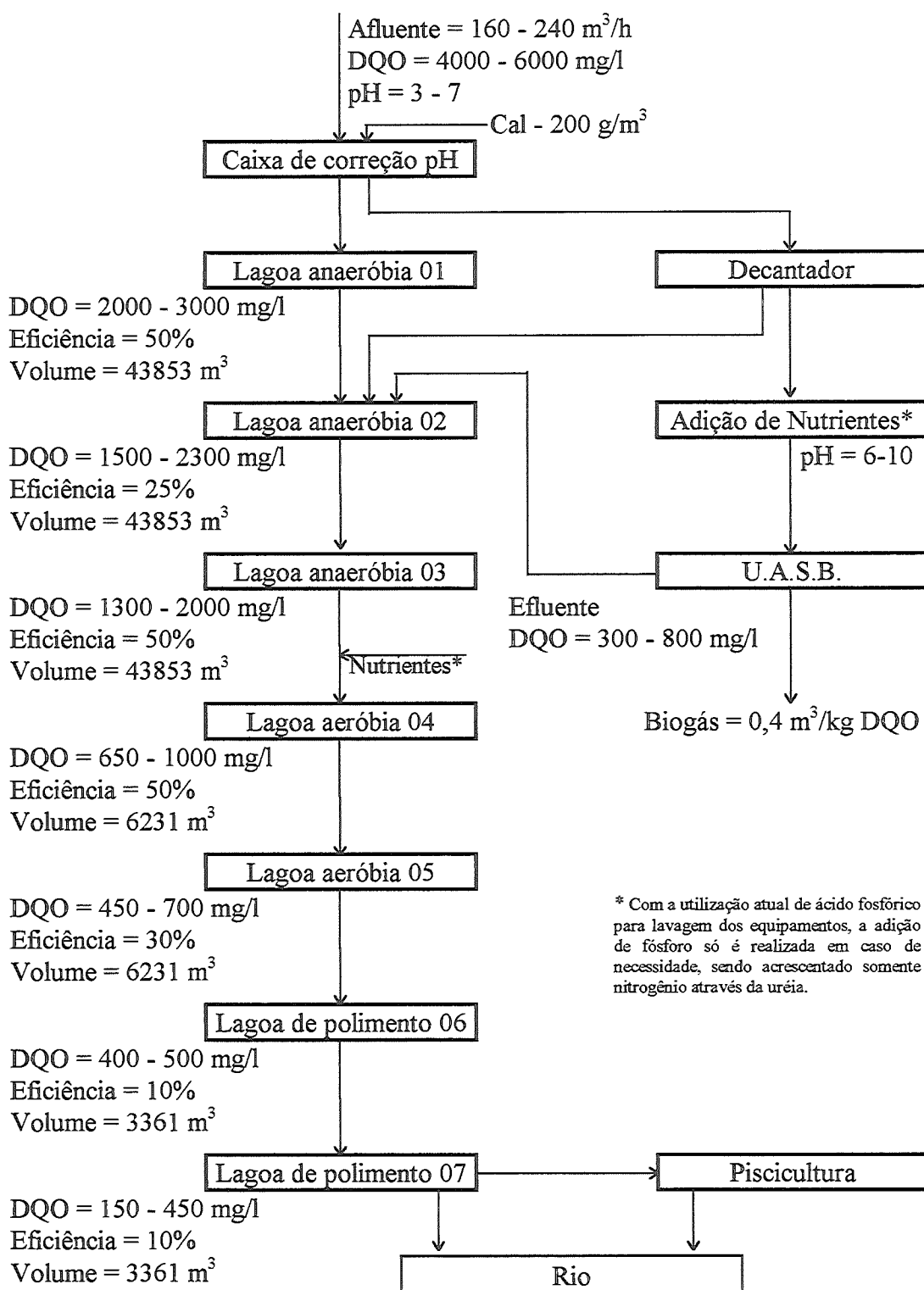


Figura 2 - Fluxograma de parte do tratamento de águas residuárias da CITROSUCO PAULISTA S/A

Fonte: indústria



Figura 3 - Vista dos biodigestores



Figura 4 - Vista da lagoa anaeróbia



Figura 5 - Vista das lagoas aeradas



Figura 6 - Vista das lagoas de maturação



Figura 7 - Vista do lodo sedimentado no fundo da lagoa de maturação, após a drenagem, exposto ao sol.

4.3. Classificação do lodo utilizado

A classificação foi realizada com base nas seguintes normas da ABNT (1987a, 1987b, 1987c):

- NBR - 10.004 - Classificação de Resíduos Sólidos
- NBR - 10.005 - Lixiviação de Resíduos Sólidos
- NBR - 10.006 - Solubilização de Resíduos Sólidos

Os métodos de análises empregados basearam-se no STANDARD METHODS FOR EXAMINATION WATER AND WASTE WATER, APHA et al. (1992). Os parâmetros analisados, com seus respectivos métodos foram:

- Potencial hidrogeniônico (pH) - Potenciômetro;
- Nitrogênio total - Nitrogênio total Kjeldahl;

- Fosfato total - Ácido ascórbico;
- Sulfetos - Titulométrico (Iodometria);
- Cloretos - Titulométrico (Nitrato mercúrio);
- Concentrações dos elementos: Zn, Pb, Cd, Ni, Fe, Mn, Cu e Cr - Espectrofotometria de Absorção atômica.

Essas análises foram realizadas no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento - SHS, do campus da USP de São Carlos.

4.4. Coleta do solo

Retirou-se o solo empregado de uma área próxima do Departamento de Hidráulica e Saneamento, no campo experimental de estaqueamento do Departamento de Geotecnia a uma profundidade de um metro. A utilização de um solo nesta profundidade teve o objetivo de minimizar a contribuição de matéria orgânica deste, no experimento. Após a coleta, o solo passou por um processo de secagem ao sol e só depois é que foi utilizado.

4.5. Classificação do solo

O solo foi classificado de acordo com a classificação textural da ABNT 7181/84 (NOGUEIRA, 1988) com base na análise granulométrica conjunta realizada no Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Geotecnia da EESC - USP.

4.6. Caracterização físico-química do lodo

O lodo foi caracterizado no Laboratório de Saneamento do SHS no campus da USP em São Carlos e no Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ - USP. Foram realizadas as seguintes análises de interesse na pesquisa:

- Umidade;
- Potencial hidrogeniônico (pH);
- Matéria orgânica total;
- Carbono total;
- Nitrogênio total;
- Fósforo total;
- Potássio total;
- Cálcio total;
- Magnésio total;
- Enxofre total;
- Relação carbono/nitrogênio.

4.7. Metodologia dos exames e análises físico-químicas do lodo

4.7.1. Umidade

A umidade percentual foi obtida pela divisão da diferença do peso da amostra na condição natural e seca a 100 - 110° C, pelo peso da amostra na condição natural e multiplicando-se o resultado por 100 (KIEHL, 1985).

4.7.2. Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH foi determinado em solução de cloreto de cálcio 0,01 M (Método Oficial) na seguinte proporção: 10g de amostra para 50 ml de solução CaCl_2 0,01. Após a agitação e descanso de 30 minutos, o pH foi medido com a utilização de potenciômetro (KIEHL, 1985).

4.7.3. Matéria orgânica total

A matéria orgânica total percentual foi determinada pelo método da perda por combustão, sendo igual a 100 vezes o quociente da diferença entre o peso da amostra seca a 100 - 110° C e o peso calcinado a 550° C pelo peso da amostra seca a 100 - 110° C (KIEHL, 1985).

4.7.4. Carbono total

O percentual de carbono total foi obtido dividindo-se o percentual de matéria orgânica total por 1,8 (KIEHL, 1985).

4.7.5. Nitrogênio total

A determinação do nitrogênio total se fez pelo método clássico de Kjeldahl, realizado em duas fases: uma, de digestão, onde a amostra é tratada por ácido sulfúrico concentrado para que o nitrogênio orgânico e amoniacal passe à forma de sulfato de amônio. A segunda fase foi a destilação do sulfato de amônio, realizada em meio alcalino para favorecer o desprendimento da amônia, a qual é recebida em uma solução de ácido bórico a 4% e titulada a seguir (KIEHL, 1985).

4.7.6. Fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre totais

As determinações de fósforo e potássio, bem como as de cálcio, magnésio e enxofre, foram realizadas a partir do extrato nitro-perclórico, utilizando-se o método colorimétrico com o emprego do vanado-molibdato de amônio para o fósforo, fotometria a chama para o potássio, espectrofotometria de absorção atômica com chama de acetileno para cálcio e magnésio e gravimetria para a determinação de enxofre (KIEHL, 1985).

4.7.7. Relação carbono/nitrogênio

A relação carbono-nitrogênio, C/N, é um parâmetro obtido dividindo-se o teor de carbono total pelo nitrogênio total encontrado na amostra, representando-se o numerador da relação obtida sempre por um número inteiro.

4.8. Caracterização físico-química do solo utilizado

A caracterização física do solo foi realizada no Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, com as seguintes determinações:

- massa específica;
- distribuição granulométrica.

Na caracterização química foram analisados os mesmos parâmetros utilizados na caracterização química do lodo. Essas análises foram feitas no Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ - USP.

4.9. Metodologia dos exames e análises físico-químicas do solo

A metodologia empregada para as determinações no solo dos seguintes parâmetros: umidade, potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica total, carbono total, nitrogênio total, fósforo total, potássio total, cálcio total, magnésio total, enxofre total e relação carbono/nitrogênio, foi a mesma descrita no item 4.7. para o lodo.

4.9.1. Massa específica

A determinação da massa específica foi realizada pelo método do picnômetro no solo passado na peneira de 4,8 mm conforme descrição da NBR-6508 (ABNT, 1984a);

4.9.2. Distribuição granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método de sedimentação e peneiramento de acordo com a NBR-7181 (ABNT, 1984b).

4.10. Montagem dos experimentos de vermicompostagem

A montagem dos experimentos foi realizada em área coberta, denominada Estação Experimental, próximo ao laboratório de microbiologia do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP.

Optou-se pela realização do experimento em área coberta para evitar o possível encharcamento das leiras com a água da chuva, podendo causar a morte das minhocas por asfixia.

As leiras para a vermicompostagem foram constituídas por 5 caixas construídas em compensado naval, tendo cada uma delas as seguintes dimensões: 0,51 m de largura, 0,54 de comprimento e 0,30 a altura útil, sendo a altura total de 0,40 m. Portanto cada caixa possuía um volume útil de 0,083 m³.

O conjunto de caixas foi colocado sobre uma mesa de madeira com 0,75 m de altura e coberto com tela plástica, conhecida comercialmente como “Sombrit”. Esta tela teve a função de proteger as minhocas da radiação solar direta, que lhes é prejudicial além de servir de proteção contra pássaros predadores.

As leiras (caixas) foram numeradas de um até cinco para a identificação de cada composição.

Além da montagem das leiras nas cinco caixas, foram montados também 5 vasos cerâmicos com capacidade de 20 litros cada, utilizando as mesmas composições e a mesma numeração das caixas. Estes vasos, ao contrário das caixas, não foram inoculados com as minhocas, mas foram mantidos sob as mesmas condições das caixas para servir de controle do processo. As Figuras 8 e 9 mostram as caixas de vermicompostagem e os vasos de controle respectivamente.



Figura 8 - Foto das caixas utilizadas na vermicompostagem.



Figura 9 - Vista dos vasos utilizados como controle do processo.

4.11. Preparo das misturas do lodo com solo

Inicialmente pensou-se em promover uma secagem prévia do lodo, mas como o seu nível de umidade era compatível com o descrito na bibliografia para o desenvolvimento da vermicompostagem, esse procedimento foi descartado.

A umidade do lodo situava-se em torno de 35% no dia de montagem do experimento. Esse nível foi obtido devido à exposição do lodo ao sol no próprio fundo da lagoa após a drenagem desta. Na Figura 7 foi mostrado o aspecto da lagoa com o lodo exposto ao sol.

Como pôde ser notado pela Figura 7, o lodo apresentava-se sob a forma de torrões, possuindo uma umidade crescente da superfície para o fundo. Este fato fez com que fosse necessário um peneiramento para quebrar os torrões e homogeneizar o lodo. Para este fim foi utilizada uma peneira de malha 8 mm.

A partir do solo seco homogeneizado e o lodo peneirado, foram montadas as dez composições, cinco nas caixas para a vermicompostagem e cinco nos vasos de controle com as seguintes massas:

- caixa 1 - 0 kg (0%) de lodo e 40 kg (100%) de solo;
- vaso 1 - 0 kg (0%) de lodo e 20 kg (100%) de solo;
- caixa 2 - 10 kg (25%) de lodo e 30 kg (75%) de solo;
- vaso 2 - 5 kg (25%) de lodo e 15 kg (75%) de solo;
- caixa 3 - 20 kg (50%) de lodo e 20 kg (50%) de solo;
- vaso 3 - 10 kg (50%) de lodo e 10 kg (50%) de solo;
- caixa 4 - 30 kg (75%) de lodo e 10 kg (25%) de solo;
- vaso 4 - 15 kg (75%) de lodo e 5 kg (25%) de solo;
- caixa 5 - 40 kg (100%) de lodo e 0 kg (0%) de solo;
- vaso 5 - 20 kg (100%) de lodo e 0 kg (0%) de solo;

As massas descritas acima referem-se ao peso seco. A umidade de montagem era de 35% no caso do lodo e para o solo, igual a 1%. Por isso foi feita a correção no peso úmido multiplicando-se os valores de lodo acima por $100/(100-35)$ e de solo por $100/(100-1)$ para permitir a montagem dos experimentos nessa umidade, porém mantendo as proporções estabelecidas em peso seco.

4.12. A escolha da minhoca utilizada

A minhoca escolhida para o desenvolvimento da pesquisa foi a *Eisenia foetida* conhecida como “minhoca vermelha da Califórnia”. Essa escolha deveu-se às características dessa espécie, que se adapta melhor ao cativeiro e apresenta uma produção mais rápida de composto. Estas características fazem dessa espécie a mais utilizada pelos criadores profissionais (CETESB, 1987).

A quantidade de minhocas necessária para o experimento foi de 2.500 unidades em fase adulta, que foram fornecidas pela Estação Experimental da CETESB de Novo Horizonte - SP.

4.13. Preparação das leiras para inoculação

Após o preparo das misturas e o enchimento das caixas e dos vasos, foram realizadas regas diárias para a obtenção e manutenção da umidade adequada para o desenvolvimento da vermicompostagem. Como a densidade de cada uma das composições era diferente, crescendo com o aumento da concentração de solo, foi necessário colocar quantidades diferentes de água em cada uma das composições. Essas regas foram realizadas de modo a deixar as leiras com uma umidade homogênea e com a máxima umidade possível, não

permitindo entretanto excesso que provocasse percolação pelo fundo das composições.

Esperou-se uma semana para obter condições estáveis para a inoculação das minhocas. A primeira determinação de umidade foi realizada no dia anterior à inoculação. Essa umidade foi mantida, praticamente constante, em cada composição durante o processo de vermicompostagem.

4.14. Inoculação das leiras

A inoculação foi realizada segundo o procedimento sugerido pela CETESB (1987). Foram colocados inicialmente 3 indivíduos por leira (caixa). Como estas minhocas penetraram no meio de cultura e lá permaneceram durante 5 horas, as demais minhocas foram transferidas para dar início ao processo.

A quantidade de minhocas para a inoculação não apresentava um consenso, sendo indicados diversos valores na bibliografia consultada.

Tomando-se por base essas bibliografias, puderam ser notadas as seguintes recomendações:

- HARRIS (1990) sugere a inoculação com 1600 g de minhoca por m³ de substrato, o que resultaria para o experimento em questão cerca de 300 minhocas por caixa (foi adotado um peso médio por minhoca de 0,26 g, segundo estimativa feita por BIDONE (1994)).
- Em CETESB (1987) é recomendada a utilização de 500 minhocas por metro quadrado, com leiras de profundidade de 0,50 m, o que daria para o experimento um total aproximado de 100 minhocas por caixa.
- Em CETESB (s.d.) é recomendada a utilização de 1500 minhocas por metro quadrado, o que resultaria para o experimento aproximadamente 400 minhocas por caixa.

- BIDONE (1994), em experimento semelhante a este, inclusive com caixas possuindo as mesmas dimensões, utilizou 500 indivíduos por caixa.

A quantidade de minhocas colocadas em cada caixa foi de 500 indivíduos, adotada segundo recomendação de BIDONE (1994), que desenvolveu sua pesquisa com sucesso em condições muito semelhantes às deste experimento.

4.15. Operação e controle do processo

As leiras foram acompanhadas durante os 75 dias de experimento, fazendo-se a manutenção da umidade durante esse período.

As regas eram feitas em dias alternados, tomando-se o cuidado de evitar a percolação de água pelo fundo das caixas e vasos e a conseqüente perda de elementos solubilizados ou em suspensão na água.

Realizou-se a determinação da umidade um dia antes da inoculação das leiras, e depois a cada 25 dias, até o final do experimento, fazendo sempre as devidas correções para a manutenção da umidade.

A coleta de amostras para as análises químicas foi feita no dia da inoculação das leiras e 75 dias depois, no final da vermicompostagem. As amostras foram retiradas em três pontos aleatórios e ao longo de toda a profundidade das caixas e dos vasos. A quantidade de material coletado para a formação de cada amostra foi de 500 g.

Após o término da vermicompostagem realizou-se a contagem das minhocas adultas (clitelo completamente desenvolvido) em cada composição.

Durante o desenvolvimento da vermicompostagem evitou-se o revolvimento das leiras e o conseqüente estresse dos vermes.

4.16. Análises físico-químicas para fins de fertilidade

As análises químicas para fins de fertilidade foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ - USP. Apenas a densidade aparente foi determinada no Laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP. As determinações realizadas foram as seguintes:

- Potencial hidrogeniônico (pH);
- Matéria orgânica total;
- Fósforo;
- Potássio;
- Cálcio;
- Magnésio;
- Hidrogênio + Alumínio;
- Capacidade de troca catiônica (CTC);
- Densidade aparente.

4.17. Metodologia das análises físico-químicas para fins de fertilidade

4.17.1. Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH foi determinado em solução de cloreto de cálcio 0,01 M da mesma forma descrita no item 4.7.2.

4.17.2. Matéria orgânica total

A matéria orgânica total percentual foi determinada pelo método da oxidação por solução de dicromato de sódio em ácido sulfúrico a frio, seguida de colorimetria (RAIJ et al., 1987).

4.17.3. Fósforo

A determinação da concentração de fósforo foi realizada através da extração do fósforo trocável usando resina trocadora de íons seguido do método colorimétrico com a utilização de molibdênio azul (RAIJ et al., 1987).

4.17.4. Potássio, cálcio e magnésio

A extração de potássio, cálcio e magnésio foi feita com resina trocadora de íons, sendo realizada a determinação da concentração de potássio por fotometria de chama, de cálcio e magnésio através de espectrofotometria de absorção atômica (RAIJ et al., 1987).

4.17.5. Hidrogênio + Alumínio

A determinação do H + Al foi realizada através do método da solução tampão SMP e que se baseia na correlação existente entre o pH da solução e os valores de H + Al (RAIJ et al., 1987).

4.17.6. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A capacidade de troca de cátions de um solo, de uma argila ou do húmus representa a quantidade de cátions retidos na superfície desses materiais, em estado permutável. Determinou-se a CTC pela soma das concentrações catiônicas dos elementos potássio, cálcio, magnésio, hidrogênio e alumínio (RAIJ et al., 1987).

4.17.7. Densidade aparente

A densidade aparente foi obtida dividindo-se a massa de solo seco e passado na peneira de 2 mm pelo volume ocupado pelo mesmo em um balão de vidro. (KIEHL, 1979).

4.18. Caracterização química das composições

Além da análises físico-químicas para fins de Fertilidade, foram realizadas caracterizações químicas no início e no final do processo em cada uma das composições das caixas e dos vasos. Os parâmetros analisados foram os mesmos descritos no item 4.6. e a metodologia seguida está descrita no item 4.7..

4.19. Utilização das misturas no fim do processo para o plantio de rabanetes

A Figura 10 mostra o aspecto das composições utilizadas para o plantio de rabanetes. A primeira e terceira fileiras são amostras das composições

vermicompostadas; a segunda e quarta fileiras são amostras das composições de controle (sem o desenvolvimento da vermicompostagem).



Figura 10 - Amostras das composições vermicompostadas e de controle

1^a (superior) e 3^a filas = composições vermicompostadas

2^a e 4^a filas = composições de controle

Foram preparados 40 sacos agrícolas com 2 kg de material cada da seguinte forma: montaram-se 4 repetições de cada um dos 5 tratamentos (caixa) resultando 20 sacos de material vermicompostado. Montaram-se também 4 repetições de cada um dos 5 vasos de controle, sem a vermicompostagem, resultando em mais 20 sacos.

Os sacos utilizados foram do tipo agrícola destinado a mudas e com capacidade de dois litros cada.

Esses sacos foram dispostos em cima de uma grade de madeira e dentro de uma estufa agrícola da seguinte forma: pegou-se a grade e dividiu-se em

quatro faixas. Em cada uma das faixas foram dispostos 5 sacos vermicompostados e 5 sacos sem a vermicompostagem de forma aleatória através de sorteio. A Tabela 4 mostra a disposição dos 40 sacos, onde o primeiro número representa cada uma das composições solo/lodo e o segundo número representado por “1” ou “0” indicam, respectivamente, as composições que foram ou não submetidas a vermicompostagem. A Figura 11 mostra os sacos prontos para o plantio, dispostos conforme a descrição.

Tabela 4 - Posicionamento aleatório dos sacos para o plantio do rabanete

repetição 1		repetição 2		repetição 3		repetição 4	
5.1	4.0	2.0	1.0	5.0	4.0	4.1	3.0
1.0	5.0	3.0	4.1	1.1	3.0	1.1	2.1
4.1	2.0	2.1	1.1	2.1	3.1	4.0	2.1
1.1	3.0	3.1	4.0	2.0	5.1	5.0	5.1
2.1	3.1	5.1	5.0	1.0	4.1	2.0	1.0



Figura 11 - Vista dos sacos prontos para o plantio dos rabanetes, dispostos de acordo com a Tabela 4.

Em cada um destes sacos, foram colocadas 4 sementes de rabanete. Estas sementes germinaram em aproximadamente uma semana e os rabanetes foram colhidos após 60 dias, já no início da fase de declínio da planta.

As plantas foram molhadas diariamente, mas sempre evitando-se a ocorrência de percolação de água pelo fundo com a conseqüente perda de nutrientes.

As Figuras 12 a 15 mostram, respectivamente, uma vista geral da estufa montada; os rabanetes recém germinados, após uma semana do plantio; 20 dias depois e 60 dias depois, já no dia da colheita.

Após a colheita dos rabanetes, estes foram lavados com água, separadas a parte aérea e a raiz, pesados e acondicionados em sacos de papel furados para a secagem em estufa com circulação de ar e temperatura variando de 65 a 70° C. A seguir realizou-se a pesagem desse material, que representa a produção de matéria seca (MALAVOLTA et al., 1989).



Figura 12 - Vista geral da estufa montada para o plantio dos rabanetes



Figura 13 - Foto dos rabanetes recém-germinados (7 dias após o plantio)



Figura 14 - Foto dos rabanetes após 20 dias do plantio



Figura 15 - Foto dos rabanetes no dia da colheita (60 dias após o plantio)

4.20. Tratamento estatístico dos resultados

Para as análises dos dados utilizou-se a análise de variâncias a três fatores, ANOVA “three-way” (NETER et al. 1990), conforme descrito no Item 4.20.1. Na impossibilidade da utilização de tal método, recorreu-se a métodos não-paramétricos (LEHMANN & D’ABRERA, 1975) como alternativa e que é descrito no Item 4.20.2.

Antes da aplicação da análise estatística, foram adotadas as convenções indicadas na Tabela 5 apresentada a seguir:

Tabela 5 - Descrição das convenções utilizadas para a análise estatística.

Fator	Níveis	Descrição
Composição	1	100% de solo e 0% de lodo
	2	75% de solo e 25% de lodo
	3	50% de solo e 50% de lodo
	4	25% de solo e 75% de lodo
	5	0% de solo e 100% de lodo
Minhoca	0	Ausência
	1	Presença
Tempo	0	Início do processo
	1	Fim do processo

Conforme pode ser observado na Tabela 5, foram avaliados os efeitos da composição (cinco níveis), da presença de minhoca (dois níveis) e do tempo (dois níveis) sobre as variações sofridas nos 9 parâmetros analisados:

- pH - potencial hidrogeniônico;
- MO - matéria orgânica;
- P - fósforo;
- K - potássio;
- Ca - cálcio;
- Mg - magnésio;
- H+Al - hidrogênio + alumínio;
- CTC - capacidade de troca catiônica;
- DA - densidade aparente.

Com os fatores considerados, resultou um experimento composto por 20 (5 níveis de composição × 2 níveis de minhoca × 2 níveis de tempo) combinações para cada um dos 9 parâmetros analisados.



Para cada tratamento foram registradas 3 observações no início do experimento e 3 no final.

4.20.1 Análise de variância - ANOVA

A técnica ANOVA “three-way” consiste em testar os efeitos principais dos fatores e o efeito da interação entre os mesmos. O modelo utilizado é dado por:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5; \quad j = 1, 2; \quad k = 1, 2; \quad l = 1, 2, 3$$

onde:

Y_{ijkl} : Valor observado;

μ : média geral;

α_i : efeito fixo do i -ésimo nível do fator caixa;

β_j : efeito fixo do j -ésimo nível do fator minhoca;

γ_k : efeito fixo do k -ésimo nível do fator tempo;

$(\alpha\beta)_{ij}$: efeito fixo da interação do i -ésimo nível do fator caixa com o j -ésimo nível do fator minhoca;

$(\alpha\gamma)_{ik}$: efeito fixo da interação do i -ésimo nível do fator caixa com o k -ésimo nível do fator tempo;

$(\beta\gamma)_{jk}$: efeito fixo da interação do j -ésimo nível do fator minhoca com o k -ésimo nível do fator tempo;

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$: efeito fixo da interação do i -ésimo nível do fator caixa com j -ésimo nível do fator minhoca e com o k -ésimo nível do fator tempo;

ε_{ijkl} : erro, ou resíduo, devido ao ajuste do modelo.

Para a validade do modelo, os componentes ε_{ijkl} devem satisfazer a três condições básicas: independência, normalidade e homocedasticidade (igualdade de variâncias). Em outras palavras, os componentes ε_{ijkl} devem ser independentes e identicamente distribuídos segundo uma distribuição normal com média zero e variância σ^2 , ou seja, $\varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$.

Caso alguma das condições acima não seja satisfeita, pode-se recorrer a uma transformação nos dados para estabilizar os resíduos, ou mais precisamente, estabilizar a normalidade ou igualdade de variâncias. As transformações normalmente utilizadas são transformações do tipo potência ou de Box-Cox.

A Tabela ANOVA, considerando os dados tratados por este método é descrita abaixo:

Tabela 6 - Tabela ANOVA

Fonte de variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F*
Composição	4	SQA	QMA	$F_A = QMA/QME$
Minhoca	1	SQB	QMB	$F_B = QMB/QME$
Tempo	1	SQC	QMC	$F_C = QMC/QME$
Composição-Minhoca	4	SQAB	QMAB	$F_{AB} = QMAB/QME$
Composição-Tempo	4	SQAC	QMAC	$F_{AC} = QMAC/QME$
Tempo-Minhoca	1	SQBC	QMBC	$F_{BC} = QMBC/QME$
Comp.-Minhoca-Tempo	4	SQABC	QMABC	$F_{ABC} = QMABC/QME$
Erro	40	SQE	QME	
Total	59	SQT		

onde:

$$SQA = 12 \sum_{i=1}^5 (\bar{Y}_{i...} - \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido ao fator caixa;}$$

$$SQB = 30 \sum_{j=1}^2 (\bar{Y}_{.j..} - \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido ao fator minhoca;}$$

$$SQC = 30 \sum_{K=1}^2 (\bar{Y}_{...K.} - \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido ao fator tempo;}$$

$$SQAB = 6 \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 (\bar{Y}_{ij..} - \bar{Y}_{i...} - \bar{Y}_{.j..} + \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido a}$$

interação composição-minhoca;

$$SQAC = 6 \sum_{i=1}^5 \sum_{k=1}^2 (\bar{Y}_{i.k.} - \bar{Y}_{i...} - \bar{Y}_{..k.} + \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido a}$$

interação caixa-tempo;

$$SQBC = 15 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (\bar{Y}_{.jk.} - \bar{Y}_{.j..} - \bar{Y}_{..k.} + \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma de quadrados devido a}$$

interação minhoca-tempo;

$$SQABC = 3 \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 (\bar{Y}_{ijk.} - \bar{Y}_{ij..} - \bar{Y}_{i.k.} - \bar{Y}_{.jk.} + \bar{Y}_{i...} + \bar{Y}_{.j..} + \bar{Y}_{..k.} - \bar{Y}_{....})^2 : \text{Soma}$$

de quadrados devido a interação caixa-minhoca-
tempo;

$$SQE = SQT - SQAB - SQA - SQB : \text{Soma de quadrados devido aos erros ou}$$

resíduos;

$$SQT = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^3 (Y_{ijkl} - \bar{Y}_{\dots})^2 : \text{Soma de quadrados total};$$

Os Y's barras estão associados com as médias amostrais dos níveis dos fatores e com as médias dos tratamentos. Os quadrados médios são obtidos dividindo-se as somas de quadrados pelos respectivos graus de liberdade, como por exemplo:

$$QMA = SQA/4 : \text{Quadrado médio do fator caixa.}$$

Para testar se o efeito dos fatores e de suas interações são significativos, utiliza-se o valor F^* da Tabela ANOVA, que é obtido dividindo-se os quadrados médios de cada efeito pelo quadrado médio dos resíduos. Para testar a interação de 3 fatores (A, B e C), por exemplo, resulta as seguintes hipóteses:

$$H_0 : (\alpha\beta\gamma)_{ijk} = 0 \text{ para toda trinca } (i, j, k)$$

contra

$$H_1 : (\alpha\beta\gamma)_{ijk} \neq 0 \text{ para alguma trinca } (i, j, k),$$

O valor da estatística F^* , dado por: $F^* = \frac{QM_{ABC}}{QM_{ERRO}}$ tem uma distribuição

F com os graus de liberdade associados com os graus de liberdade dos quadrados médios do numerador e denominador. No caso de rejeição de H_0 a análise deve prosseguir através da utilização de comparações múltiplas (MILLIKEN et al. 1984). Os efeitos principais de cada fator deverão ser testados, da mesma maneira, através dos valores correspondentes.

Uma vez assumido o modelo descrito na Equação (1), deve-se checar a validade das suposições iniciais de igualdade de variância e normalidade dos resíduos.

Para verificar se há ou não igualdade de variâncias (ou homocedasticidade) foi utilizado o teste de Bartlett (NETER et al., 1990), além do gráfico de resíduos versus valores ajustados.

Na verificação da normalidade utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (LEHMANN & D'ABRERA, 1975) e o gráfico normal probabilístico.

4.20.2 Teste de Duncan para comparações múltiplas

Quando o teste F da Tabela ANOVA mostrar que as médias dos tratamentos não são iguais, é natural perguntar onde ocorreu a diferença. Esta pergunta pode ser respondida pela aplicação das comparações múltiplas de DUNCAN, que é um teste que detecta se as diferenças entre as médias são significativas, permitindo um agrupamento dos tratamentos semelhantes.

Na aplicação do teste de Duncan, é definida a diferença mínima significativa (dms) como sendo a menor diferença segundo a qual as médias de dois tratamentos são consideradas diferentes. Esta dms é dada por:

$$dms = q_{v,k;\alpha} \sqrt{\frac{QME}{n}}$$

onde: QME = quadrado médio do erro.

n = número de observações em cada tratamento.

v = graus de liberdade do erro.

k = número de médias no grupo.

$q_{v,k;\alpha}$ = valor para o teste de Duncan a um nível de significância α tabelado, com v graus de liberdade e k médias.

Para a aplicação do teste de Duncan deve-se inicialmente ordenar as k médias. Através da dms compara-se a maior com a menor média. Se a diferença é significativa, então utiliza-se o mesmo processo para comparar as médias em intervalos de $k-1$ médias, caso contrário, as médias serão todas agrupadas num único grupo de tamanho k .

Na comparação em intervalos de $k-1$ médias, haverá agora 2 grupos com as médias de 2 a k e de 1 a $k-1$. Dessa forma, a cada nova comparação os intervalos são reduzidos de uma média, sendo necessário uma comparação a mais e o processo é repetido até que todas as médias estejam classificadas.

Sempre que duas médias não são estatisticamente diferentes, não se podem testar as diferenças das médias compreendidas entre as mesmas.

Para o teste de Duncan é usual colocar as médias ordenadas de forma crescente da esquerda para a direita e, toda vez que duas médias forem iguais, sublinha-se o intervalo delimitado por elas, formando um grupo. Assim, as médias sublinhadas por uma mesma linha serão estatisticamente iguais. Por exemplo, para a representação:

A B C D

a diferença entre as médias A e D é significativa, entretanto as médias de A e C não diferem significativamente, da mesma forma as médias de B e D também não diferem.

4.20.3 Análise Não-Paramétrica - Teste de Kruskal-Wallis

Este método foi utilizado para analisar as variáveis que não satisfizeram as suposições para a aplicação da técnica ANOVA, ou seja, as condições de igualdade de variância e normalidade dos resíduos.

Para o teste de Kruskal-Wallis, de acordo com LEHMANN et al. (1975), cada uma das N (neste caso 60) observações é substituída pelo seu respectivo posto, isto é, os N valores observados são dispostos em uma série única de postos. Ao menor valor é atribuído o posto 1, ao seguinte o posto 2, ..., e ao maior, o posto N.

Feito isto, determina-se a soma dos postos em cada um dos k (neste caso 20) tratamentos. O teste de Kruskal-Wallis determina se essas somas são tão díspares, a ponto de não ser possível afirmar que todos os k tratamentos sejam iguais.

O teste de Kruskal-Wallis é definido pela estatística:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \times \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

onde:

k : número de tratamentos;

n_i : número de observações no tratamento i;

N : $\sum_{i=1}^k n_i$, número total de observações;

R_i : soma dos postos de cada tratamento;

As hipóteses testadas são as seguintes:

H_0 : Não há diferenças entre os tratamentos;

contra

H_1 : Pelo menos um dos tratamentos difere dos demais.

Sob H_0 , a estatística H tem distribuição Qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade. Então, se H é maior que o valor qui-quadrado com $k-1$ graus de liberdade (tabelado), para um nível α especificado, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, os tratamentos não são todos iguais.

Será adotada uma correção devido a quantidade pequena de amostras para o nível de significância α (GABRIEL et al., 1969), de forma que o nível de significância do teste será dado por:

$$\alpha' = \alpha - 0.02$$

4.20.4 Teste de Wilcoxon para comparações múltiplas

O teste de Wilcoxon das somas dos postos (Wilcoxon rank-sum test) também pode ser visto como um procedimento de classificação para o caso em que tivermos $k > 2$ tratamentos (LEHMANN & D'ABRERA, 1975).

Seja $k = 20$ tratamentos, os quais deseja-se que sejam ordenados. Tal classificação pode ser obtida testando-se os $\binom{k}{2} = 190$ pares de tratamentos de acordo com o teste das somas dos postos. Considerando-se que esteja sendo testado o tratamento B contra o tratamento A. Então, tem-se as seguintes hipóteses:

H_0 : Não há diferença entre os tratamentos;

contra

H_1 : O tratamento B é superior (ou inferior) ao tratamento A.

Sejam W_A e W_B as somas dos “ranks” (postos) dos tratamentos A e B, respectivamente. Então a hipótese H_0 é rejeitada quando a soma W_B é grande, ou seja $W_B \geq c_2$, e também quando é pequena, $W_B \leq c_1$. Neste caso, tem-se as seguintes decisões a serem tomadas:

$$\begin{aligned} B \text{ é superior a } A & \text{ se } W_B \geq c_2, \\ B \text{ é inferior a } A & \text{ se } W_B \leq c_1, \\ \text{Nada se conclui} & \quad c_1 \leq W_B \leq c_2, \end{aligned} \tag{2}$$

onde $c_2 > c_1$, $B = 1, 2, \dots, k-1$ e $A = B+1, \dots, k$.

As constantes c_1 e c_2 são determinadas tal que, sob H_0 , a probabilidade de rejeição é igual a um nível de significância α , tal que:

$$P_{H_0}(W_B \leq c_1) + P_{H_0}(W_B \geq c_2) = \alpha$$

O procedimento consiste simplesmente em aplicar o teste (5) para todos os 190 pares de tratamentos possíveis.

O resultado das comparações pode ser representado visualmente colocando-se os números referentes aos tratamentos numa linha horizontal. O tratamento (ou grupo) considerado inferior deve estar sempre à esquerda, sendo que aqueles tratamentos onde não foi observada diferença, deverão ser agrupados por uma linha cheia. Por exemplo, $3 \underline{2 \ 1 \ 4}$ indica que o tratamento 3 é superior aos tratamentos 2, 1 e 4 mas que os pares (2,1), (2,4) e (1,4) não diferem significativamente.

5. RESULTADOS

Os resultados apresentados em forma de tabelas ou figuras se encontram nos Anexos A e B, respectivamente.

5.1. Classificação do lodo sedimentado proveniente do tratamento de águas residuárias da indústria de sucos cítricos

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do lodo, obtidos nas análises realizadas no laboratório de Saneamento do Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC - USP entre os dias 12 e 20/06/95 estão representados na Tabela A-1.

Conforme ABNT (1987a), os resultados obtidos a partir dos ensaios de lixiviação e solubilização permitem classificar o lodo como Resíduo Classe II - não inerte.

5.2. Classificação do solo utilizado juntamente com o lodo como substrato

Os resultados da análise de granulometria conjunta estão representados na Tabela A-2 e na Figura B-1.

Conforme a classificação textural da ABNT (1984a), a análise granulométrica permite classificar o solo como uma areia fina siltosa.

5.3. Caracterização físico-química dos substratos (lodo e solo)

Os resultados obtidos nas caracterizações químicas e análises para fins de fertilidade do lodo e do solo antes da montagem dos experimentos estão representados nas Tabelas A-3 e A-4 respectivamente.

5.4. Controle de umidade

Realizou-se a primeira rega diária em 23/10/95, logo após a montagem do experimento. A umidade foi determinada 7 dias depois, em 30/10/95, quando a umidade já estava uniformemente distribuída sem ter sido verificada a percolação de água pelo fundo das caixas. Logo após, as composições foram inoculadas com as minhocas. A Tabela A-5 apresenta os resultados das determinações de umidade durante o desenvolvimento da vermicompostagem.

Pode-se observar uma variação de umidade entre as cinco composições. Esta variação fez-se necessária devido à diferença de densidade de cada composição. Esta densidade decrescente da primeira para a quinta composição resulta, portanto, numa umidade crescente nessa mesma ordem a fim de evitar o encharcamento e percolação de água.

Caso não tivesse sido feita essa variação de umidade, a composição 1, por exemplo, composta por 100% de solo e que apresenta a maior densidade poderia ficar totalmente encharcada se fosse mantida na mesma umidade da composição 5 (100% de resíduo) que apresenta a menor densidade.

A umidade foi mantida praticamente constante em cada uma das composições durante o desenvolvimento do experimento. As regas foram realizadas lentamente e bem distribuídas na superfície das composições,

tomando o cuidado de evitar a percolação de água através do fundo das caixas e a conseqüente perda de materiais.

5.5. Caracterização química das composições

As Tabelas A-6, A-7 e A-8 mostram, respectivamente, os resultados das análises químicas realizadas em cada uma das 5 composições no início do experimento em 30/10/95 e no final do processo, no dia 16/01/96, para as 5 composições vermicompostadas e as cinco composições de controle.

5.6. Análises químicas para fins de fertilidade das composições

As Tabelas A-9, A-10 e A-11 mostram os resultados das análises químicas para fins de fertilidade realizadas em cada uma das composições no início e no final do processo para as 5 composições vermicompostadas e as cinco composições de controle.

As Figuras B-2 a B-9 são gráficos de médias de cada um dos parâmetros (pH, MO_t , P, K, Ca, Mg, H+Al e CTC) indicativos da fertilidade das composições e permitem visualizar as alterações sofridas pelos efeitos das composições, do tempo e da vermicompostagem.

5.7. Densidade aparente das composições

A Tabela A-12 apresenta os valores obtidos para a densidade aparente determinada em cada uma das três amostras de cada composição, no início e no fim do processo, tanto nas leiras de vermicompostagem como nas leiras de

controle. A Figura B-10 apresenta as médias para densidade aparente no início do processo e no final, com e sem a vermicompostagem.

5.8. Evolução da população de minhocas

A contagem do número de minhocas em cada composição realizada no final do processo, teve como critério a contagem dos indivíduos adultos (clitelo desenvolvido).

As 500 minhocas, inoculadas em cada uma das leiras, tinham um peso médio de 0,38 g/indivíduo.

A Tabela A-13 apresenta a quantidade de minhocas e seus respectivos pesos médios em cada uma das 5 composições no final do processo. As Figuras B-11 a B-15 ilustram o aspecto dessas minhocas recolhidas.

Pode-se observar que tanto o número como o peso das minhocas é gradualmente superior nas composições com maior concentração de lodo. Nas composições 4 (75 % de lodo) e 5 (100 % de lodo), o peso manteve-se praticamente igual ao peso médio dos indivíduos no início do processo. O número de indivíduos teve um pequeno aumento em relação aos 500 indivíduos inicialmente inoculados.

Além das composições 4 e 5 apresentarem número e peso dos indivíduos muito semelhantes, constatou-se visualmente durante a contagem que essas composições apresentavam um número de indivíduos jovens e de casulos muito superior ao apresentado pelas demais composições, mostrando a melhor adaptação das minhocas.

5.9. Produtividade dos rabanetes plantados nos diversos tratamentos

As Tabelas A-14 e A-15 mostram, respectivamente, a massa de rabanete na umidade natural e seca em estufa (matéria seca) produzida pelo cultivo destes nos tratamentos de controle, ou seja, sem vermicompostagem.

Os rabanetes, cultivados nos substratos vermicompostados, produziram as massas indicadas nas Tabelas A-16 e A-17 na umidade natural e seca em estufa respectivamente.

Pode-se notar que houve uma grande variabilidade nas massas obtidas de cada tratamento.

As Figuras B-16 a B-20 apresentam, respectivamente, para cada uma das composições, a comparação entre os rabanetes plantados nas composições de controle e os plantados no vermicomposto.

5.10. Tratamento estatístico dos resultados das análises químicas para fins de fertilidade e da densidade aparente

As variáveis: potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica total (MO_t), fósforo, potássio, cálcio, magnésio, hidrogênio + alumínio, capacidade de troca catiônica (CTC) e densidade aparente foram submetidas à análise de variâncias, verificando-se a normalidade e a homocedasticidade (igualdade de variâncias) dos erros ou resíduos devido ao ajuste do modelo dado pela técnica ANOVA “three way”.

Os dados referentes à matéria orgânica total, ao magnésio e à densidade aparente atenderam às condições de normalidade e homocedasticidade. Para as demais variáveis foram testadas várias transformações para estabilizar a normalidade e a variância dos resíduos, obtendo sucesso no caso do fósforo e do potássio.

Nos casos em que o teste de F da Tabela ANOVA mostrou que as médias dos tratamentos não são iguais para algum efeito (de composição,

minhoca ou tempo) ou interações desses efeitos, foi aplicado o teste de Duncan para comparações múltiplas que permite ordenar e agrupar os tratamentos estatisticamente semelhantes.

Para as variáveis: pH, cálcio, hidrogênio + alumínio e CTC, não foi possível a aplicação desse método e foram tratados através da análise não paramétrica, utilizando-se o teste de Kruskal-Wallis para verificar a existência de possíveis diferenças entre os tratamentos. O resultado da aplicação desse teste pode ser visto na Tabela A-18. Nos casos em que esse teste detectou diferenças entre os tratamentos, recorreu-se ao teste das comparações múltiplas de Wilcoxon para a determinação dos diferentes grupos.

A Tabela A-19 mostra os resultados do teste de Kolmogorov-Smirnov para da normalidade dos resíduos das variáveis tratadas pela técnica ANOVA. A verificação da homocedasticidade (igualdade de variância dos resíduos) para as mesmas variáveis foi realizada pelo teste de Bartlett e os resultados são apresentados na Tabela A-20. Pode-se observar que a variável magnésio não faz parte desta tabela. Isso se deve ao fato dos dados obtidos apresentarem 3 amostragens com resultados idênticos para uma mesma composição, o que impede a aplicação deste teste (NETER et al., 1990). Neste caso utilizou-se apenas o gráfico para decidir pela homocedasticidade dos resíduos.

As Figuras B-21 a B-30 mostram graficamente a homocedasticidade e a normalidade dos resíduos para as variáveis: matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio e densidade aparente.

5.10.1. Potencial hidrogeniônico (pH)

O teste de Kruskal-Wallis aplicado à variável pH mostrou que as diferenças apresentadas entre os tratamentos foi significativa, pois o valor de p

que é apresentado na Tabela A-18 é menor do que 0,05. Aplicou-se portanto o teste de Wilcoxon, cujos resultados são apresentados na Figura B-31.

As comparações múltiplas de Wilcoxon para o pH no Tempo zero mostraram a formação de dois grupos distintos: um formado pelas composições 5, 4 e 1 e o outro, com valores superiores de pH, formado pelas composições 3 e 2. O gráfico de médias apresentado na Figura B-2 confirma este resultado.

No Tempo 1, ou seja, decorridos 75 dias, pode-se verificar que a composição 4, na presença de minhoca tem pH superior aos grupos formados pelas composições 2 e 5, na ausência de minhoca e pelos grupos formados pelas composições 2 e 3, na presença de minhoca. Esse fato também pode ser observado pelo gráfico de médias na Figura B-2. Ainda analisando o gráfico de médias pode-se observar um pequeno declínio do pH com o decorrer do tempo tanto com a presença como com a ausência de minhocas.

5.10.2. Matéria orgânica total

A Tabela A-21 mostra o resultado da aplicação da técnica ANOVA “Three-way” para a análise de variância com três fatores (composição, minhoca e tempo) para matéria orgânica. Pela tabela pode-se verificar que não foi detectado efeito da minhoca e suas interações. Os efeitos da composição, do tempo e da interação composição-tempo foram significativos. A aplicação do teste de Duncan apresentado na Figura B-32 para a interação composição-tempo mostra a formação de seis grupos. Os percentuais médios de matéria orgânica aumentam da composição 1 para a composição 5 tanto no tempo zero como no tempo 1. Por outro lado, o percentual de matéria orgânica para composições iguais mostrou-se superior no tempo 1, ou seja, indica o desenvolvimento de processo de síntese de matéria orgânica no decorrer do

experimento. A gráfico de médias mostrado na Figura B-3 auxilia na visualização destes resultados.

5.10.3. Fósforo

Para analisar a quantidade de fósforo pela técnica ANOVA foi necessária uma transformação para estabilizar a variância e a normalidade dos resíduos, conforme citação anterior. Obteve-se a seguinte variável transformada:

$$Fosforo^* = [fosforo]^{1/4}$$

O resultado da aplicação da análise de variância com três fatores para o fósforo é apresentado na Tabela A-22 e pode-se observar que são significativos os efeitos da composição, do tempo e das interações composição-minhoca, composição-tempo e composição-minhoca-tempo. A aplicação do teste de Duncan para a interação composição-minhoca-tempo apresentado na Figura B-33 mostra que no tempo zero, as composições com e sem a presença de minhocas são iguais, visto que no início do experimento foi realizada uma análise única englobando cada uma das composições. Pode-se notar ainda que a concentração de fósforo aumenta da composição 1 para a composição 5, com exceção da composição 4, que apresenta concentração de fósforo superior às demais. No tempo 1, ou seja, no final do processo, as composições vermicompostadas 3, 4 e 5 e as composições de controle (sem vermicompostagem) 4 e 5 são estatisticamente semelhantes e possuem concentrações de fósforo superiores às demais. Para a maioria das composições podem ser observadas concentrações superiores de fósforo nos tratamentos com vermicompostagem. Isto indica um possível aumento do

fósforo disponível com a vermicompostagem. A Figura B-4 ilustra, através do gráfico de médias, os resultados obtidos.

5.10.4. Potássio

Para analisar a quantidade disponível de potássio através da técnica ANOVA foi necessária a aplicação de uma transformação para estabilizar a variância e a normalidade dos resíduos. Obteve-se a seguinte expressão, através da transformação de Box-Cox, para a variável potássio:

$$Potassio^* = \frac{[Potassio]^{-1} - 1}{-28.00063}$$

Pelos valores de F apresentados na Tabela A-23 verificou-se que os efeitos dos fatores composição, minhoca e tempo e das interações composição-tempo e minhoca-tempo foram significativos. Os efeitos das demais interações não foram significativos.

Para analisar a interação composição-tempo e minhoca-tempo utilizou-se a análise de comparações múltiplas de Duncan, cujos resultados se encontram na Figura B-34 em conjunto com o gráfico de médias apresentado na Figura B-5.

Analisando-se a interação composição-tempo, verificou-se a existência de 4 grupos não muito bem delimitados, porém pode-se destacar o grupo formado pela composição 4 no tempo zero e 1 e a composição 3 e 5 no tempo 1, com as maiores concentrações de potássio, enquanto que, na outra extremidade, encontram-se as composições 1, nos tempos zero e 1, e a composição 2 no tempo zero, com as menores concentrações de potássio. Como se pode notar, as maiores quantidades de potássio ocorreram no final do

processo (tempo 1), o que indica um aumento na disponibilidade desse elemento na mistura solo/lodo com o decorrer do tempo.

O estudo da interação minhoca-tempo mostra que tanto a presença de minhoca quanto o tempo interagem no aumento disponibilidade de potássio na mistura, sendo essa disponibilidade aumentada com a vermicompostagem e com o passar do tempo.

5.10.5. Cálcio

A aplicação do teste de Kruskal-Wallis para a variável cálcio detectou diferenças entre os tratamentos, pois o valor de p , que é apresentado na Tabela A-18, é menor do que 0,05. Aplicou-se portanto o teste de Wilcoxon cujos resultados são apresentados na Figura B-35 para identificar os grupos de tratamentos diferentes.

As comparações múltiplas de Wilcoxon mostram que a quantidade de cálcio disponível cresce com o aumento da concentração de lodo no tempo 0 e pode-se identificar a formação de três grupos distintos: o primeiro formado pelas composições 1, o segundo pelas composições 2 e o terceiro pelas composições 4. Como no tempo zero, não havia ainda a ação das minhocas, cada composição de mesmo número apresenta as mesmas características, seja com ou sem a presença de minhoca.

No tempo 1 (no final do processo) pode-se identificar a formação de 4 grupos distintos, mas não há a formação de um padrão bem definido que permita estabelecer uma tendência de aumento da disponibilidade de cálcio. A análise do teste de Wilcoxon fornece ainda uma indicação da existência dos efeitos de minhoca, tempo e composição na disponibilidade de cálcio.

O gráfico de médias apresentado na Figura B-6 indica uma redução na disponibilidade de cálcio para as composições de 1 a 3 quando passa do tempo

zero para o tempo 1, tanto na presença como na ausência de minhocas. Já no tempo 1, a disponibilidade de cálcio nas composições de 1 a 3 e na 5 é maior nas vermicompostadas do que nas de controle. Somente a composição 4 apresentou maior disponibilidade de cálcio no tempo 1 sem a vermicompostagem.

5.10.6. Magnésio

O resultado da aplicação da técnica ANOVA para magnésio apresentado na Tabela A-24 mostra que foi significativo os efeitos da composição, do tempo e da interação composição-tempo sobre a disponibilidade deste elemento.

A aplicação do teste de Duncan para a interação composição-tempo apresentado na Figura B-36 mostra a formação de 4 grupos distintos com a disponibilidade crescente deste elemento para concentrações maiores de lodo e para o tempo final. Também pode ser notado que no fim do processo há indicativo de que a quantidade de magnésio disponível é superior à apresentada no início, exceto para a composição 4. O gráfico de médias mostrado na Figura B-7 permite verificar estes resultados.

5.10.7. Hidrogênio + alumínio (H+Al)

A aplicação do teste de Kruskal-Wallis para H+Al apresentado na Tabela A-18 detectou diferenças entre os tratamentos para um nível de significância de 5% ($p < 0,05$). A aplicação do teste de comparações múltiplas de Wilcoxon para identificação dos diferentes grupos apresentados na Figura B-37 mostrou a formação de dois grupos distintos no tempo zero. O primeiro grupo é formado pelas composições 2, 3 e 5 e o segundo é formado pelas

composições 1 e 4 e que apresentam as maiores concentrações de hidrogênio + alumínio. No tempo 1 pode-se observar que os grupos formados pelas composições com a presença de minhocas apresentam as menores concentrações de H+Al. O gráfico de médias mostrado na Figura B-8 permite a visualização clara destes resultados. A análise desse gráfico em conjunto com as comparações de Wilcoxon (Figura B-37) indica a ocorrência de alterações devido às composições, ao tempo e à atuação das minhocas. A concentração de H+Al aumentou com o passar do tempo nas composições sem vermicompostagem e diminuiu nas composições vermicompostadas.

5.10.8. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A aplicação do teste de Kruskal-Wallis para a CTC, mostrado na Tabela A-18, detectou diferenças entre os tratamentos e portanto foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Wilcoxon para identificar os diferentes grupos.

As comparações múltiplas de Wilcoxon, apresentadas na Figura B-38, mostram que a CTC cresce com o aumento da concentração de lodo no tempo 0, exceto na composição 4, e pode-se identificar a formação de três grupos diferentes: o primeiro formado pelas composições 1, o segundo pelas composições 2 e o terceiro pelas composições 4. Como no tempo zero, não havia ainda a ação das minhocas, cada composição de mesmo número apresenta as mesmas características, seja com ou sem a presença de minhoca.

No tempo 1 pode-se identificar a formação de 4 grupos, mas não há a formação de um padrão bem definido que permita estabelecer uma tendência clara de aumento da CTC. A análise do teste de Wilcoxon fornece ainda uma indicação da existência dos efeitos de minhoca, tempo e composição na CTC.

O gráfico de médias apresentado na Figura B-9 indica uma redução na CTC para as composições de 1 a 3 quando passa do tempo zero para o tempo

1, tanto na presença como na ausência de minhocas. Já no tempo 1, a CTC nas composições de 1 a 3 e na 5 é maior nas vermicompostadas do que nas de controle. Somente a composição 4 apresentou maior CTC no tempo 1 sem a vermicompostagem.

A capacidade de troca catiônica teve praticamente o mesmo comportamento do cálcio.

5.10.9. Densidade aparente

Os dados referentes à densidade aparente permitiram a aplicação da técnica ANOVA. Os resultados apresentados na Tabela A-25 mostram que foi significativo apenas o efeito da composição. O teste de Duncan apresentado na Figura B-39 mostra que cada composição forma um grupo com densidade aparente diferente. Pode-se notar também que a densidade aparente decresce com o aumento da concentração de lodo. O gráfico de médias apresentado na Figura B-10 ilustra estes resultados.

5.11. Tratamento estatístico dos resultados da produção de matéria seca pelos rabanetes

Os resultados da produção de matéria seca pela parte aérea e bulbo dos rabanetes, após a aplicação de transformações, satisfizeram as condições de normalidade e homocedasticidade de resíduos mostradas nas Figuras B-40 a B-43 e comprovadas pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e pelo teste de Bartlett apresentados nas Tabelas A-19 e A-20 respectivamente. Portanto, puderam ser tratados pela técnica ANOVA para a análise de variâncias.

No caso da parte aérea foi necessário utilizar a transformação abaixo nos dados originais para obter a homocedasticidade e a normalidade dos resíduos:

$$Parte\ aerea^* = (Parte\ aerea)^{-0.25}$$

Pela Tabela A-26, verificou-se que o efeito da composição e o efeito da interação composição-minhoca influenciaram na produção de matéria seca da parte aérea (talos e folhas) do rabanete. Pelas comparações múltiplas de Duncan mostradas na Figura B-44, observou-se a formação de 3 grupos. A menor quantidade de matéria seca foi registrada na Caixa 1, tanto na presença quanto na ausência de minhoca. Verificou-se ainda que para as demais combinações de composição com minhoca não existiu diferença significativa quanto à quantidade de matéria seca produzida.

Para o bulbo foi necessário a aplicação da seguinte transformação para a realização da análise de variâncias pela técnica ANOVA:

$$Bulbo^* = (Bulbo)^{0.25}$$

Pela Tabela A-27, verificou-se que o efeito do fator composição foi o único significativo. A análise das comparações múltiplas de Duncan apresentada na Figura B-45 mostrou a formação de 2 grupos, podendo destacar apenas a composição 1 como aquela onde houve a menor quantidade de matéria seca registrada. Para as demais composições, estatisticamente não foi observada nenhuma diferença quanto à quantidade de matéria seca produzida pelos bulbos.

6. DISCUSSÃO

6.1. Estabelecimento da duração dos experimentos

A duração de 75 dias para a fase de vermicompostagem foi adotada dentro da faixa descrita na literatura.

BIDONE (1995), que desenvolveu seus experimentos de vermicompostagem sob condições muito semelhantes às empregadas neste trabalho, utilizou um período de 60 dias em algumas fases e de 90 dias para outras. Este último período mostrou-se um pouco longo, sendo verificada a fuga de algumas minhocas. CETESB (s.d.) recomenda um período de 60 dias, fixado baseado na vermicompostagem de composto de lixo urbano desenvolvida na cidade de Novo Horizonte - SP. Segundo KNÄPPER (1990), o tempo de vermicompostagem deve ser fixado levando-se em conta a dificuldade de degradação de cada material. O autor acredita que se deva levar em conta na fixação do período de vermicompostagem a quantidade de indivíduos adicionados por volume ou por massa de material a ser tratado.

O desenvolvimento da fase de plantio de rabanetes nos compostos resultantes teve seu período de 60 dias definido segundo informações fornecidas pessoalmente pelos técnicos da EMBRAPA de São Carlos.

6.2. Controle da umidade

A umidade mantida na vermicompostagem, nesta pesquisa, situou-se entre 12% (no caso de solo puro) a 43% (para lodo puro).

Segundo EDWARDS & LOFTY (1972), em solos contendo umidade de até 12% ainda são encontradas quantidades significativas de minhocas.

EDWARDS et al. (1984) recomendam uma umidade de 50 a 90% para a vermicompostagem de excrementos animais. CETESB (1987) recomenda que o material a ser vermicompostado seja umidecido de tal forma que se evite o seu encharcamento. O autor considera que deva ser levado em conta a densidade do material a ser vermicompostado para a determinação da umidade ideal. Assim, para materiais mais densos, resultaria uma umidade ideal menor.

6.3. Potencial hidrogeniônico

O pH parece ter sido pouco influenciado pela atuação direta das minhocas, pois tanto nos experimentos vermicompostados, como nos de controle, pôde ser observado uma redução semelhante do pH permanecendo entretanto próximo da neutralidade. ALBANELL et al. (1988), em experimentos de vermicompostagem de excrementos de ovelha e resíduos de algodão, verificaram uma diminuição no valor do pH, ficando próximo da neutralidade. Ele atribui esse decréscimo do pH ao CO₂ e a ácidos orgânicos produzidos durante o metabolismo microbológico. Segundo DINDAL (1978), as minhocas modificam o pH para níveis aproximadamente neutros. EDWARDS et al. (1984) e APPELHOF (1981) afirmam que as minhocas têm uma ampla tolerância ao pH, podendo este variar desde aproximadamente 4 até valores em torno de 9.

6.4. Matéria orgânica total

A análise estatística não detectou efeito da vermicompostagem na variação da matéria orgânica total. As variações sofridas são portanto decorrentes de outros fatores como a atuação de outros microrganismos nas composições. No final do processo foi observado um aumento na porcentagem de matéria orgânica total. Usualmente ocorre redução da porcentagem de matéria orgânica pela degradação natural com o decorrer do tempo, como citam HERVAS et al. (1989). BIDONE (1995) obteve em seus experimentos com resíduos de curtume um aumento da matéria orgânica na vermicompostagem em praticamente todas as leiras, inclusive na leira de controle. Numa segunda fase de seu experimento, ele se surpreendeu novamente com o aumento de matéria orgânica observado também nas leiras que continham apenas composto orgânico de lixo urbano. Ele sugeriu que o aumento verificado foi devido à secreções intestinais e urinárias das minhocas.

Neste trabalho, o aumento de matéria orgânica mostrou, através da análise estatística, não ser devido à atuação das minhocas.

6.5. Fósforo

A quantidade de fósforo disponível, de acordo com a análise estatística, foi afetada pela composição de cada leira, pela vermicompostagem e pela ação do tempo que representa as reações químicas ocorridas naturalmente bem como o efeito de microrganismos diferentes daqueles presentes no trato intestinal das minhocas.

Pôde ser observada uma tendência de aumento de fósforo na sua forma disponível às plantas (como fosfato solúvel). De acordo com EDWARDS et al. (1984), a quantidade de fósforo solúvel parece ser aumentada com a vermicompostagem. Na maioria dos trabalhos experimentais de vermicompostagem de que se tem conhecimento, são feitas as análises de fósforo

total e não de sua forma disponível. BIDONE (1995) não obteve variação na concentração de fósforo total com a vermicompostagem. Afirma que no meio minhocultor existe a convicção de que os excrementos das minhocas são mais ricos em nutrientes e que na realidade o que ocorre é que as minhocas aumentam a disponibilidade de nutrientes e não a concentração do mesmo. ALBANELL et al. (1988) obtiveram aumento do fósforo assimilável na vermicompostagem de excremento de ovelhas e resíduos de cultura de algodão.

6.6. Potássio

No caso da disponibilidade de potássio (forma iônica), pôde ser observado um nítido aumento com a vermicompostagem. Entretanto houve também efeitos do tempo e da composição na sua disponibilidade, segundo a análise estatística. O aumento de potássio disponível assim como o de fósforo com a vermicompostagem é citado por EDWARDS et al.(1984) como resultado do enriquecimento da atividade microbiológica promovida pelas minhocas. ALBANELL et al. (1988) obtiveram aumento na quantidade de potássio na vermicompostagem de excremento de ovelhas e resíduos de cultura de algodão.

6.7. Cálcio

A disponibilidade de cálcio diminuiu com o decorrer do experimento, tanto nas composições vermicompostadas como nas composições de controle. No final do processo, as composições vermicompostadas possuíam uma quantidade de cálcio disponível maior do que as de controle, com exceção da composição 4 que apresentou comportamento oposto. A composição 4

apresentou resultados divergentes das demais em praticamente todas as variáveis estudadas. A causa desse fato não foi elucidada.

FRANZ (1978) mostra resultados obtidos com a vermicompostagem de um lodo com solo, sendo verificado um aumento da concentração de cálcio trocável no vermicomposto quando comparado com a mesma composição sem a atuação da minhoca. HERVAS et al. (1989) afirmam que a concentração de cálcio total em lodo de esgoto compostado aumenta quando estes são submetidos à vermicompostagem. BIDONE (1995) verificou uma tendência de redução na concentração de cálcio total no decorrer da vermicompostagem.

6.8. Magnésio

A vermicompostagem, segundo a análise estatística, não afetou a disponibilidade de magnésio. As variações sofridas refletem os efeitos decorrentes das diferenças de composição e do tempo, sendo que a disponibilidade de magnésio tende a aumentar com o aumento da concentração de lodo e com o decorrer do tempo. BIDONE (1995) não obteve variação significativa de magnésio total com o desenvolvimento da vermicompostagem. EDWARDS et al. (1984) dizem que a quantidade de magnésio disponível parece ser aumentada com a vermicompostagem, o que não foi observado neste trabalho. HERVAS et al. (1989), com base em experimentos de vermicompostagem de composto de lixo urbano, determinaram um aumento na concentração de magnésio total no vermicomposto em relação ao composto original.

6.9. Hidrogênio + alumínio

O resultado obtido para a concentração de hidrogênio + alumínio nas formas iônicas foi surpreendente. Houve uma nítida redução da concentração deste conjunto através da vermicompostagem. Como houve uma pequena redução do pH no final da vermicompostagem, o que indica um pequeno aumento na concentração hidrogeniônica, deduz-se que foi o alumínio que sofreu uma diminuição de sua concentração na forma iônica para que se chegasse a esses resultados. De acordo com KIEHL (1985), a quantidade de alumínio na forma iônica, que é prejudicial às plantas, pode ser complexado na forma de fosfatos insolúveis reduzindo assim a sua disponibilidade. Talvez o aumento da disponibilidade de fósforo, na forma de fosfatos solúveis verificado na vermicompostagem, seja o responsável pela diminuição da disponibilidade do alumínio.

6.10. Capacidade de troca catiônica (CTC)

A capacidade de troca catiônica (CTC) parece ter diminuído com o passar do tempo, tanto nas leiras de controle como nas de vermicompostagem. Entretanto, no final do processo, a CTC mostrou-se maior nas composições vermicompostadas do que nas de controle, com exceção da composição 4. De acordo com ALBANELL et al. (1988), o aumento da CTC, geralmente observado no vermicomposto reflete os diferentes níveis de mineralização da matéria orgânica e o aumento de ácidos húmicos que são reconhecidos como tendo maior CTC. MITCHELL et al. (1977) citam que a diminuição de ácidos húmicos verificada com o tempo em alguns processos de vermicompostagem pode ser atribuído à posterior degradação de compostos de ácidos húmicos instáveis por microrganismos aeróbios.

BIDONE (1995), em experimentos de vermicompostagem de resíduos de curtume, também obteve uma menor CTC no final da vermicompostagem do que no início.

6.8. Densidade aparente

O principal objetivo da determinação da densidade aparente foi tornar possível a conversão das análises químicas para fins de fertilidade de concentração em volume para concentração em massa. A densidade aparente variou apenas em função das composições, não sendo afetada pelo tempo e nem pela vermicompostagem. Este fato se deve a metodologia empregada nessa determinação, em que o material foi secado, desaglutinado e peneirado nas mesmas condições em que se realizaram as análises químicas para fins de fertilidade. Este procedimento destruiu as estruturas do material. Pelo exposto, pode-se verificar que a realização das análises químicas em volume não afetou a precisão dos resultados de cada parâmetro analisado, sendo possível realizar a conversão de concentração em volume para concentração em massa através dos resultados obtidos para a densidade aparente.

6.8. Evolução da população de minhocas

Os resultados obtidos permitem verificar que as minhocas se adaptam muito bem no resíduo puro, não sendo necessária a utilização de misturas com solo ou qualquer outro material para melhorar a vermicompostagem. O peso médio das minhocas na inoculação era de 0,38 g por indivíduo e ao término do experimento o peso final no lodo puro se manteve inalterado. Com a diminuição da concentração de lodo e conseqüente aumento da quantidade de

solo, pôde ser notada uma redução gradual no peso médio das minhocas, causada provavelmente pela falta de alimento para as mesmas.

APPELHOF (1981) cita que a *Eisenia foetida*, cultivada em estrume de gado ou de cavalos, apresenta um peso individual situado entre 0,3 e 0,8 gramas.

BIDONE (1995), utilizou a *Eisenia foetida* com peso médio de 0,26 g em experimentos com resíduos de curtume e observou redução desse peso. Ele sugeriu que este fato foi decorrente de dieta alimentar inadequada, sendo em alguns casos devido à toxicidade do resíduo e em outros pela escassez de alimentos.

6.8. Produção de rabanetes no vermicomposto

A análise estatística detectou efeito da atuação da vermicompostagem na produção de matéria seca somente na parte aérea. No bulbo houve aparentemente somente o efeito da composição solo/lodo. O estudo dos resultados desta fase do trabalho foi prejudicado pelo fato de nem todas as sementes terem germinado. Isso fez com que a competição por espaço e luminosidade fosse diferente para algumas composições, interferindo, assim, na igualdade de condições de crescimento das plantas. De acordo com as informações contidas na embalagem da semente utilizada, esta teria uma germinação de 95%, e por isso foram colocadas 4 sementes por sacos de plantio, esperando-se que apenas uma não nascesse ou se nascesse, fosse então arrancada para manter todas em condições idênticas. Isso não aconteceu e em alguns saquinhos não houve a germinação de nenhuma semente. Analisando os saquinhos em que nenhuma semente germinou, pôde-se notar que esses são constituídos por material não vermicompostado (controle). Em todos os saquinhos vermicompostados houve o nascimento de pelo menos duas plantas.

Este resultado indica que o vermicomposto parece ter favorecido a germinação. Além disso, pode-se notar através das fotos mostradas nas Figuras B-16 a B-20 que os rabanetes produzidos no vermicomposto apresentam uma aparência melhor do que aqueles produzidos nas composições de controle. FRANZ (1978) cita trabalhos em que a vermicompostagem aumentou a germinação de trigo. RHEE (s.d.) mostra que as raízes desenvolvidas sob a atuação da vermicompostagem são mais grossas e mais numerosas.

A produção de rabanetes cresceu com o aumento da concentração de lodo, sendo nitidamente pobre no solo puro. Os resultados não permitiram estabelecer uma relação clara entre o rabanete produzido no vermicomposto e no material sem a vermicompostagem, embora a análise estatística tenha detectado, conforme citação anterior, efeito do vermicomposto na produção de matéria seca pela parte aérea.

7. CONCLUSÕES

O lodo de origem anaeróbia utilizado para o desenvolvimento da vermicompostagem mostrou excepcional aceitação pelas minhocas, podendo ser vermicompostado sem a adição de outros materiais para permitir a adaptação e desenvolvimento destas.

As análises químicas indicativas da fertilidade desse material mostraram que a atuação das minhocas melhora a disponibilidade de alguns dos elementos estudados (fósforo e potássio).

A vermicompostagem reduziu de alguma forma a concentração de alumínio na sua forma iônica, que é comprovadamente nocivo ao desenvolvimento vegetal.

Os teores de umidade indicados para o desenvolvimento da vermicompostagem devem ser revistos de modo a se levar em conta a densidade aparente do material.

Os métodos analíticos utilizados para a determinação de elementos existentes no solo, na sua forma trocável, se mostraram muito interessantes, visto que nesta forma é que eles são absorvidos pelos vegetais e podem indicar melhor a potencialidade do vermicomposto ou do próprio resíduo para a utilização na agricultura.

Os resultados das análises químicas do lodo, tanto vermicompostado como na sua forma natural, mostraram grande potencialidade para aplicação no condicionamento do solo, o que já vem sendo realizado pela indústria com o cultivo de eucaliptos. Deve-se ressaltar que devem ser avaliados os efeitos

sobre o meio ambiente da fração desse material colocado no solo que poderá ser lixiviada e atingir corpos d'água e também águas subterrâneas.

O cultivo de rabanetes como indicativo da fertilidade dos vermicompostos não forneceu resultados conclusivos sobre a vermicompostagem. Entretanto a produtividade é favorecida pelo aumento da concentração do lodo no solo.

Estudos mais aprofundados sobre o efeito do vermicomposto nos vegetais são necessários e deve-se levar em conta a necessidade nutricional de cada tipo de cultura. Assim, um determinado vermicomposto pode apresentar melhores resultados em algumas culturas do que em outras.

A aplicação da análise estatística mostrou-se um instrumento muito importante na análise dos resultados, dando maior confiabilidade nas conclusões obtidas.

VERAS (1996) desenvolveu experimentos paralelamente aos desenvolvidos neste trabalho, utilizando lodo sedimentado proveniente do tratamento de águas residuárias de indústria de sucos cítricos consorciado com composto de lixo urbano e traz resultados e conclusões que complementam este trabalho.

8. RECOMENDAÇÕES

O presente estudo foi realizado trabalhando-se com uma série de fatores e características na sua forma natural. O estudo mais controlado de cada um dos elementos através da utilização de substratos preparados artificialmente poderia facilitar a elucidação dos mecanismos que promovem essas alterações, como por exemplo a redução da disponibilidade de alumínio verificada com a vermicompostagem.

A realização da vermicompostagem com a utilização de 40 kg de substrato por leira mostrou-se excessivamente grande, podendo-se trabalhar com quantidades menores e possibilitando um maior número de repetições. Esta recomendação está baseada no fato de no final deste trabalho ter ocorrido a inoculação acidental de um vaso plástico de 2 litros que continha lodo puro, pela fuga de minhocas da caixa de matrizes com o término do substrato após a vermicompostagem. O vaso, mesmo sem controle de umidade, foi rapidamente e totalmente vermicompostado.

Outra sugestão é a realização de um maior controle de massas na vermicompostagem, utilizando um suporte para a vermicompostagem impermeável e realizando a recirculação da água percolada pelas regas, além de utilizar água destilada.

Com relação à utilização de plantas para a indicação da fertilidade do material, seria melhor utilizar plantas que possam ser transplantadas. Assim pode-se fazer uma seleção de mudas com mesmas características para serem plantadas nos substratos, minimizando os efeitos das diferenças encontradas

nas sementes. Além disso, utilizar apenas uma planta por vaso, o que elimina o fator de competição entre elas.

9. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ALBANELL E. et al. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia foetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and Fertility of Soils*, p.266-269,1988.
- APPELHOF, M. Current progress in Earthworm research. *Biocycle*, p. 36-38, nov./dez 1981.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR-5734 - *Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm - Determinação da massa específica*. São Paulo, 1984a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS . NBR-7181 - *Análise granulométrica - Método de ensaio*. São Paulo, 1984b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10.004 - *Resíduos Sólidos - Classificação*. São Paulo, 63p. 1987a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10.005 - *Lixiviação de Resíduos Sólidos*. São Paulo, 10p. 1987b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-10.006 - *Solubilização de Resíduos Sólidos*. São Paulo, 02p. 1987c.

BARBOSA, R.M. *Utilização de resíduos de curtume em culturas de Phaseolus vulgaris (feijão), Raphanus sativus (rabanete) e Eruca sativa (rúcula)*. São Carlos, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BIDONE, F.R.A. *A vermicompostagem dos resíduos sólidos de curtume, brutos e previamente lixiviados, utilizando composto orgânico urbano como substrato*. São Carlos, 1995. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BRADY, N.C. *Natureza e propriedade dos solos* s.l., s.ed., 1983.

CARMODY, F. earthworm composting - a growing technology. *Compost Science / Land Utilization*, p. 30-31, set./out. 1979.

CAUDURO, F.; DORFMAN, R. *Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem*. Porto Alegre PRONI:IPH-UFGRS. 216p. 1990.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Lixo: um problema sem solução? Só depende de você!* Novo Horizonte, CETESB, s.d. 17p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Utilização de minhocas na produção de composto orgânico*. São Paulo, CETESB, 1987. 8p.

- DINDAL, D.L. Soil organisms and stabilizing wastes. *Compost Science / Land Utilization*, p. 8-11, jul./ago. 1978.
- EDWARDS, C.A. & LOFTY, J.R. *Biology of earthworms*. London, Chapman and Hall Ltd, 1972.
- EDWARDS C.A. et al. The use of earthworms for composting farm wastes. *Composting of agricultural and other wastes: proceedings of a seminar organised by the Commission of the European Communities, Directorate-General Science, Research and Development, Environment Research Programme*. Brasenose College, Oxford, 1984 p.229-242.
- FRANZ, M.F. The economic future of the earthworm in recycling. *Compost Science / Land Utilization*, p. 23-26, nov./dez. 1978.
- HARRIS, G.D. et al. Vermicomposting in a rural community. *Biocycle*, p.48-51, jan. 1990.
- HERVAS L. et al. Chemical and physico-chemical characterization of vermicomposts and their humic acid fractions. *The Science of the Total Environment*. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1989. p.543-550.
- KIEHL, E.J. *Manual de edafologia - relações solo-planta* São Paulo, Ceres, 1979.
- KIEHL, E.J. *Fertilizantes orgânicos*. Piracicaba, Ceres, 1985.

- KNÄPPER, C. *Vermicompostagem: uma nova proposta de discussão*. Estudos Leopoldinenses, São Leopoldo, UNISINOS, v.26, n.115, 49p, jan./fev., 1990.
- LEHMANN, E.L. & D'ABRERA, H.J.M. (1975), *Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks*. Holden-day, Inc.
- MALAVOLTA, E. et al. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.
- MELLO, F.A.F. et al. *Fertilidade do solo*. São Paulo, Nobel, 1983.
- MILLIKEN, G. A. & JOHNSON, D. E. (1984), *Analysis of Messy Data, V. 1: Design of Experiments*. Belmont, CA: Lifetime Learning Publications.
- MITCHELL et al. Conversion of sludges into "topsoils" by earthworms. *Compost Science / Land Utilization*, p.28-32, jul./ago. 1977.
- MIYASAKA et al. *Adubação orgânica, adubação verde e rotação de culturas no estado de São Paulo*. Campinas, Fundação Cargil, 1984.
- NETER, J.; WASSERMAN, W. e KUTNER M. (1974), *Applied Linear Statistical Models*. Richard D. Irwin, Inc. - 3ª. - edição.
- PEREIRA NETO, J.T. Conceitos modernos de compostagem. *Engenharia Sanitária*. Rio de Janeiro. p.104-108, v.28, n.2, abr./jun. 1989.

RAIJ, B. et al. *Análise química do solo para fins de fertilidade* Campinas, Fundação Cargil, 1987.

RAMEH C.A.S. Projeto de uma usina de compostagem. *Engenharia Sanitária*. Rio de Janeiro. p.201-203, v.20, n.2, abr./jun. 1981.

RHEE J.A.V. Some aspects of the productivity of orchards in relation to earthworm activities. *snt*. p.281-287.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTE WATER, APHA et al. Washington, 1992

TEDESCO et al. *Análises de solos, plantas e outros materiais*. Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, UFRGS, Porto Alegre-RS. Boletim técnico, n.5, 188p. 1985.

VERAS, L.R.V. *A vermicompostagem do lodo de lagoas consorciado com composto de lixo orgânico urbano*. São Carlos, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

8. ANEXOS

8.1. Anexo A - Tabelas

Tabela A-1 - Resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização.

Parâmetro	lodo	
	lixiviação	solubilização
pH*	6,1 - 7,6	5,2 - 8,0
Nitrogênio total (mg/l)	12	112
Fosfato (mg/l)	0,25	13,4
Sulfetos (mg/l)	ND	2,9
Cloretos (mg/l)	1,7	29,7
Zinco (mg/l)	0,11	0,07
Chumbo (mg/l)	0,22	ND
Cádmio (mg/l)	ND	ND
Níquel (mg/l)	0,09	0,15
Ferro (mg/l)	0,47	1,96
Manganês (mg/l)	0,95	0,56
Cobre (mg/l)	ND	ND
Cromo (mg/l)	ND	ND

* Os pHs referem-se ao início e fim do ensaio

ND = não detctado

Tabela A-2 - Análise granulométrica conjunta do solo.

Peneiramento (fração grossa do solo)				Sedimentação (fração fina)		
Peneira	Retido (g)	Retido (%)	Ret. Ac. (%)	Tempo (min)	D (mm)	N (%)
#4	0	0,0	0,0	1	0,0525	20,5
#10	0	0,0	0,0	2	0,0374	18,9
#16	0,07	0,1	0,1	4	0,0266	17,3
#30	3,17	4,3	4,4	8	0,0188	17,3
#50	17,94	24,2	28,6	15	0,0137	17,3
#100	25,01	33,7	62,3	30	0,0097	17,3
#200	10,24	13,8	76,1	60	0,0068	17,5
ρ média dos sólidos = 2,67 g/cm ³				120	0,0048	16,6
				240	0,0033	15,2
				480	0,0024	14,5

ρ = massa específica

D = diâmetro

Ac. = acumulado

N = porcentagem de partículas com D inferior ao diâmetro correspondente

Tabela A-3 - Caracterização físico-química dos substratos (solo e lodo).

Parâmetro	Substrato	
	Solo	Lodo
Umidade (%)	1	65
pH	6,9	6,6
MO _t (%)	4,56	12,75
C _t (%)	2,53	7,08
N _t (%)	0,08	0,75
P _t (%)	0,02	0,37
K _t (%)	0,03	0,04
Ca _t (%)	0,38	26,85
Mg _t (%)	0,03	0,10
S _t (%)	0,04	0,20
C/N	32/1	9/1
Massa específica seca		

OBS.: Base seca a 105 - 110° C

pH = potencial hidrogeniônico

MO_t = matéria orgânica total

C_t = carbono total

N_t = nitrogênio total

P_t = fósforo total

K_t = potássio total

Ca_t = cálcio total

Mg_t = magnésio total

S_t = enxofre total

C/N = relação carbono e nitrogênio totais

Tabela A-4 - Análises químicas para fins de fertilidade dos substratos (solo e lodo).

Parâmetro	Substrato	
	Solo	Lodo
pH	7,5	7,4
MO _t (%)	1,8	4,8
P (µg/cm ³)	31	216
K (meq/cm ³)	0,13	0,20
Ca (meq/cm ³)	23,0	49,0
Mg (meq/cm ³)	0,5	0,7
H+Al (meq/cm ³)	0,9	0,8
CTC (meq/cm ³)	24,5	50,7

OBS.: base seca a 40 - 45° C

pH = potencial hidrogeniônico

MO_t = matéria orgânica total

P = fósforo trocável

K = potássio trocável

Ca = cálcio trocável

Mg = magnésio trocável

H+Al = hidrogênio e alumínio trocáveis

CTC = capacidade de troca catiônica

Tabela A-5 - Resultados das determinações de umidade.

Datas Composição	Umidade (%)			
	30/10/95	08/11/95	05/12/95	16/01/96
1	12,0	12,5	14,2	12,0
2	17,5	21,0	22,7	22,3
3	25,5	26,5	30,0	29,5
4	32,0	33,0	36,7	35,5
5	39,0	40,0	42,8	42,7

Tabela A-6 - Caracterização química das cinco composições antes do desenvolvimento da vermicompostagem.

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	6,9	7,0	6,9	6,7	6,6
MO _t	4,56 %	6,67 %	7,23 %	9,91 %	12,75 %
C _t (%)	2,53 %	3,70 %	4,01 %	5,51 %	7,08 %
N _t (%)	0,08 %	0,04 %	0,29 %	0,64 %	0,75 %
P _t (%)	0,02 %	0,12 %	0,12 %	0,25 %	0,37 %
K _t (%)	0,03 %	0,03 %	0,03 %	0,03 %	0,04 %
Ca _t (%)	0,38 %	5,06 %	8,10 %	15,00 %	26,85 %
Mg _t (%)	0,03 %	0,08 %	0,08 %	0,08 %	0,10 %
S _t (%)	0,04 %	0,12 %	0,11 %	0,15 %	0,20 %
C/N	32/1	92/1	14/1	9/1	9/1

OBS: os valores estão expressos em % de massa seca

Tabela A-7 - Caracterização química das cinco composições após o processo de vermicompostagem.

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	7,3	7,1	7,2	7,3	7,3
MO _t	5,30 %	7,09 %	8,50 %	10,57 %	13,08 %
C _t (%)	2,94 %	3,94 %	4,73 %	5,87 %	7,27 %
N _t (%)	0,07 %	0,44 %	0,44 %	0,64 %	0,86 %
P _t (%)	0,01 %	0,10 %	0,17 %	0,33 %	0,46 %
K _t (%)	0,02 %	0,03 %	0,03 %	0,05 %	0,04 %
Ca _t (%)	0,63 %	5,76 %	9,81 %	17,37 %	24,87 %
Mg _t (%)	0,03 %	0,06 %	0,11 %	0,09 %	0,12 %
S _t (%)	0,05 %	0,09 %	0,13 %	0,13 %	0,18 %
C/N	43/1	9/1	11/1	9/1	8/1

OBS: os valores estão expressos em % de massa

Tabela A-8 - Caracterização química das cinco composições, após o desenvolvimento da vermicompostagem, nas composições de controle (sem a presença de minhocas).

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	7,0	6,9	7,1	7,1	7,0
MO _t	4,40 %	6,14 %	7,99 %	10,46 %	13,19 %
C _t (%)	2,44 %	3,41 %	4,44 %	5,82 %	7,33 %
N _t (%)	0,11 %	0,28 %	0,36 %	0,57 %	0,86 %
P _t (%)	0,06 %	0,17 %	0,24 %	0,38 %	0,51 %
K _t (%)	0,02 %	0,02 %	0,03 %	0,03 %	0,04 %
Ca _t (%)	1,90 %	5,59 %	11,30 %	19,97 %	28,73 %
Mg _t (%)	0,03 %	0,04 %	0,05 %	0,08 %	0,09 %
S _t (%)	0,03 %	0,04 %	0,13 %	0,16 %	0,20 %
C/N	22/1	12/1	12/1	10/1	8/1

OBS: os valores estão expressos em % de massa

Tabela A-9 - Resultados das análises para fins de fertilidade realizadas em 30/10/96, antes do desenvolvimento da vermicompostagem (3 amostras em cada composição).

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	7,4	7,6	7,6	7,4	7,4
	7,5	7,8	7,6	7,4	7,4
	7,6	7,6	7,6	7,4	7,4
MO (%)	1,7	2,7	3,5	4,5	4,4
	1,7	2,4	3,7	5,3	4,8
	2,7	2,7	3,4	4,4	5,3
P ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	22	87	137	292	216
	33	91	177	312	202
	92	92	206	249	230
K ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,12	0,12	0,16	0,40	0,19
	0,15	0,12	0,17	0,23	0,15
	0,14	0,14	0,20	0,23	0,25
Ca ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	33,0	41,0	54,0	52,0	44,0
	21,0	45,0	43,0	53,0	45,0
	46,0	46,0	43,0	48,0	59,0
Mg ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,4	0,4	0,8	1,1	0,7
	0,6	0,4	0,7	0,9	0,6
	0,6	0,6	0,7	0,9	0,8
H+Al ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8
	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8
	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8
CTC ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	34,4	42,3	55,8	54,4	45,7
	22,7	46,3	44,7	55,0	46,6
	47,5	47,5	44,7	50,0	60,9

Tabela A-10 - Resultados das análises de fertilidade das cinco composições realizadas em 16/01/96, após o processo de vermicompostagem (3 amostras em cada composição).

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	7,2	6,8	6,6	7,2	7,2
	6,5	6,7	6,9	7,2	7,1
	7,1	7,0	6,8	7,3	5,9
MO (%)	2,0	3,1	4,0	4,3	4,7
	2,0	3,2	4,1	4,6	5,2
	2,0	3,3	3,9	4,3	5,8
P ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	36	124	221	232	228
	47	117	224	249	182
	46	126	255	252	287
K (meq/100 cm^3)	0,14	0,26	0,28	0,27	0,27
	0,19	0,25	0,29	0,25	0,26
	0,16	0,21	0,27	0,30	0,30
Ca (meq/100 cm^3)	25,0	28,0	31,0	35,0	37,0
	9,2	37,0	31,0	37,0	28,0
	6,6	36,0	57,0	29,0	90,0
Mg (meq/100 cm^3)	0,5	0,7	0,9	0,8	0,8
	0,6	0,6	0,9	0,7	0,8
	0,5	0,6	1,0	0,8	1,2
H+Al (meq/100 cm^3)	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8
	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8
	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8
CTC (meq/100 cm^3)	26,4	29,8	33,0	36,8	38,9
	10,8	38,7	32,9	38,7	29,9
	8,1	35,5	59,1	30,8	92,3

Tabela A-11 - Resultados das análises de fertilidade das cinco composições realizadas em 16/01/96, após o desenvolvimento da vermicompostagem nas composições de controle - sem minhocas (3 amostras em cada composição).

Parâmetro	Composição				
	1	2	3	4	5
pH	7,1	6,7	7,0	7,2	7,1
	7,4	6,8	7,2	7,2	6,5
	7,1	7,1	7,1	7,1	6,6
MO (%)	1,6	3,2	4,4	4,1	5,7
	1,7	3,3	3,8	5,3	6,4
	1,8	2,8	4,5	4,9	5,8
P ($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)	67	82	203	202	269
	62	84	126	216	238
	63	108	163	210	255
K ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,10	0,15	0,21	0,19	0,26
	0,11	0,20	0,16	0,21	0,25
	0,11	0,17	0,18	0,19	0,30
Ca ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	15,0	25	31,0	51,0	59,0
	8,0	28,0	26,0	50,0	34,0
	8,1	42,0	28,0	44,0	43,0
Mg ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,5	0,8	0,9	0,9	1,0
	0,5	0,8	0,7	0,9	1,2
	0,5	0,7	0,7	0,8	1,3
H+Al ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	0,9	1,0	0,9	0,9	1,0
	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0
	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0
CTC ($\text{meq}/100 \text{ cm}^3$)	16,5	27,0	33,0	53,0	61,3
	9,5	29,9	27,8	52,0	36,5
	9,6	43,8	29,8	46,0	45,6

Tabela A-12 - Densidade aparente dos substratos no início e no final do processo.

Composição	Densidade Aparente (g/cm ³)		
	início do processo	final do processo (no vermicomposto)	final do processo (no controle)
1	1,21	1,27	1,28
	1,27	1,28	1,26
	1,27	1,24	1,25
2	1,32	1,16	1,17
	1,17	1,19	1,17
	1,16	1,22	1,23
3	1,05	1,05	1,05
	1,02	1,03	1,03
	1,05	1,07	1,04
4	0,91	0,89	0,92
	0,94	0,91	0,90
	0,90	0,93	0,92
5	0,81	0,89	0,85
	0,86	0,74	0,79
	0,74	0,83	0,84

Tabela A-13 - População de minhocas com os respectivos pesos médios no final da vermicompostagem.

Composição	Nº de minhocas	Peso médio por indivíduo
1	72	0,24 g
2	102	0,26 g
3	250	0,29 g
4	586	0,37 g
5	580	0,38 g

Tabela A-14 - Massa produzida de rabanetes com umidade natural nas composições de controle (sem vermicompostagem).

Composição	Massa de rabanetes produzida - umidade natural (em gramas)					
	Planta número 1		Planta número 2		Planta número 3	
	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo
1	1,90	4,7	8,85	11,54	1,71	0,58
1	3,81	10,59	7,2	22,28		
1	6,35	5,69	7,39	10,46	3,01	1,87
1	4,22	6,12	7,34	20,49	3,30	5,41
2	27,59	15,67				
2						
2	26,74	43,96	70,25	87,49		
2	12,45	17,82	36,13	72,08	35,65	42,75
3	54,82	81,59				
3	63,61	57,55				
3	20,72	20,63	20,24	20,95		
3	23,98	36,50				
4						
4	25,29	1,67	43,18	19,79		
4	111,69	31,36				
4	92,37	111,51				
5	39,67	17,82	93,60	105,08	55,16	60,80
5						
5						
5	56,20	31,59				

Obs: A numeração das plantas de 1 a 3 corresponde as plantas de um mesmo vaso e para cada vaso foram realizadas 4 repetições de cada tratamento.

Tabela A-15 - Produção de matéria seca de rabanetes nas composições de controle (sem vermicompostagem).

Composição	Massa seca de rabanetes produzida (em gramas)					
	Planta número 1		Planta número 2		Planta número 3	
	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo
1	0,19	0,39	0,69	0,79	0,14	0,07
1	0,28	0,68	0,57	1,48		
1	0,55	0,54	0,62	0,81	0,23	0,17
1	0,36	0,49	0,65	1,48	0,27	0,37
2	1,90	0,97				
2						
2	1,79	2,23	5,05	5,54		
2	1,06	1,03	2,58	2,71	2,42	2,08
3	4,05	4,00				
3	3,95	3,00				
3	1,50	1,07	1,53	1,13		
3	1,61	1,97				
4						
4	1,46	0,14	2,75	1		
4	6,70	2,24				
4	6,24	6,08				
5	2,50	0,97	7,35	6,52	4,5	3,54
5						
5						
5	3,52	1,81				

Obs: A numeração das plantas de 1 a 3 corresponde as plantas de um mesmo vaso e para cada vaso foram realizadas 4 repetições de cada tratamento.

Tabela A-16 - Massa de rabanete produzida na umidade natural nas composições vermicompostadas.

Compo- sição	Massa de rabanetes produzida - umidade natural (em gramas)							
	Planta número 1		Planta número 2		Planta número 3		Planta número 4	
	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo
1	2,41	7,80	3,18	4,76				
1	4,26	6,75	1,58	1,68	0,54	0,30		
1	2,77	4,96	1,76	1,73				
1	1,86	1,00	1,39	3,70				
2	34,00	48,55	24,39	18,17				
2	38,08	21,15	45,83	22,11	19,28	7,82		
2	19,08	12,18	13,72	4,03	59,68	55,85		
2	14,84	15,03	36,67	28,89	19,56	12,33		
3	16,28	3,97	25,79	7,12	53,70	19,22	26,01	12,96
3	25,26	12,16	58,78	37,15	58,57	21,11		
3	40,40	29,18	49,63	70,98				
3	17,72	10,71	52,11	16,39				
4	35,47	15,22	109,74	82,77				
4	58,08	96,33	71,07	39,05				
4	24,28	26,96	23,81	10,09	50,43	70,93		
4	10,31	1,70	30,23	35,12	75,09	84,42		
5	51,63	89,94	22,09	24,23				
5	32,45	19,18	38,67	18,6	41,95	19,88	49,44	32,30
5	31,88	11,18	91,19	34,64	27,76	12,74	48,21	37,65
5	43,58	19,47	58,45	56,95	31,84	37,40		

Obs: A numeração das plantas de 1 a 4 corresponde às plantas de um mesmo vaso e para cada vaso foram realizadas 4 repetições de cada tratamento.

Tabela A-17 - Produção de matéria seca de rabanetes nas composições vermicompostadas.

Compo- sição	Massa seca de rabanetes produzida (em gramas)							
	Planta número 1		Planta número 2		Planta número 3		Planta número 4	
	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo	folhas	bulbo
1	0,22	0,79	0,29	0,45				
1	0,29	0,49	0,13	0,16	0,05	0,04		
1	0,23	0,40	0,14	0,15				
1	0,14	0,08	0,12	0,26				
2	3,21	3,54	2,15	1,64				
2	2,90	1,35	3,89	1,61	1,33	0,50		
2	0,16	0	1,36	0,81	1,04	0,27	4,57	3,57
2	1,39	1,28	3,09	2,17	1,56	0,88		
3	1,35	0,32	2,16	0,59	5,24	1,72	2,52	1,02
3	2,25	0,74	5,54	2,91	4,58	1,46		
3	2,86	1,62	3,75	3,84				
3	1,45	0,74	4,26	1,39				
4	2,56	1,14	9,27	5,99				
4	4,66	5,21	4,91	2,33				
4	1,99	1,70	1,90	0,85	3,98	4,47		
4	0,69	0,15	1,84	1,75	5,97	5,11		
5	3,54	4,34	1,57	1,24				
5	2,95	1,37	3,17	1,81	3,13	1,63	4,39	2,4
5	2,65	0,73	7,62	2,71	1,78	0,61	3,39	2,55
5	3,35	1,50	5,33	3,87	2,69	2,53		

Obs: A numeração das plantas de 1 a 4 corresponde as plantas de um mesmo vaso e para cada vaso foram realizadas 4 repetições de cada tratamento.

Tabela A-18 - Testes de Kruskal-Wallis para as variáveis pH, Ca, H+Al e CTC

Variável	Graus de liberdade	H (Estatística de teste)	p
pH	19	54.45	0.0001
Ca	19	43.29	0.0010
H+Al	19	48.05	0.0001
CTC	19	43.52	0.0010

Tabela A-19 - Teste de Kolmogorov-Smirnov para a normalidade dos resíduos.

Variável	Símbolo	Valor observado D	p
Matéria orgânica	MO	0.069	(>) 0.15
Fósforo*	P*	0.096	(>) 0.15
Potássio*	K*	0.098	(>) 0.15
Magnésio	Mg	0.079	(>) 0.15
Densidade Aparente	DA	0.124	0.031
Parte aérea*	PA*	0.081	(>) 0.15
Bulbo*	B*	0.060	(>) 0.15

* indica o teste foi aplicado na variável transformada

Tabela A-20 - Teste de Bartlett.

Variável	Símbolo	B	B'	$P(F_{f_1, f_2} > B')$
Matéria orgânica	MO	12.048	0.6276	0.8870
Fósforo*	P*	28.755	1.5349	0.0674
Potássio*	K*	16.973	0.8808	0.6076
Densidade Aparente	D.A.	27.670	1.4746	0.0874
		Valor observado B ou χ_0		$P(\chi_{19}^2 > \chi_0)$
Bulbo*	B*	11.608		0.236
Parte aérea*	PA*	10.780		0.291

* indica o teste foi aplicado na variável transformada.

OBS: para as variáveis MO, P*, K* e D.A. foi aplicada a correção para pequenas amostras, calculando-se B'. Para B* e PA* não foi necessário.

Tabela A-21 - Tabela ANOVA para MO_t .

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	93.242	23.301	177.940	0.0001*
Minhoca	1	0.104	0.104	0.800	0.3780
Tempo	1	2.860	2.860	21.830	0.0001*
Composição -Minhoca	4	0.468	0.117	0.890	0.4770
Composição -Tempo	4	2.302	0.576	4.39	0.0050*
Minhoca-Tempo	1	0.104	0.104	0.800	0.3780
Comp-Minhoca-Tempo	4	0.468	0.117	0.890	0.4770
Erro	40	5.240	0.131		
Total	59	104.790			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-22 - Tabela ANOVA para fósforo (transformado).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	19.997	4.494	313.650	0.0001*
Minhoca	1	0.019	0.019	1.350	0.2530
Tempo	1	0.137	0.137	9.540	0.0040*
Composição -Minhoca	4	0.190	0.047	3.310	0.0200*
Composição -Tempo	4	0.506	0.127	8.830	0.0001*
Minhoca-Tempo	1	0.019	0.019	1.350	0.2530
Comp-Minhoca-Tempo	4	0.190	0.047	3.310	0.0200*
Erro	40	0.573	0.014		
Total	59	19.611			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-23 - Tabela ANOVA para potássio (transformado).

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	0.144	0.0360	45.080	0.0001*
Minhoca	1	0.013	0.0131	16.460	0.0001*
Tempo	1	0.019	0.0193	24.180	0.0001*
Composição -Minhoca	4	0.005	0.0012	1.460	0.2320
Composição -Tempo	4	0.030	0.0075	9.440	0.0001*
Minhoca-Tempo	1	0.013	0.0131	16.460	0.0001*
Comp-Minhoca-Tempo	4	0.005	0.0012	1.460	0.2320
Erro	40	0.032	0.0007		
Total	59	0.261			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-24 - Tabela ANOVA para magnésio.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	1.4593	0.3648	34.745	0.0000*
Minhoca	1	0.0107	0.0107	1.016	0.3196
Tempo	1	0.1927	0.1927	18.350	0.0001*
Composição -Minhoca	4	0.0727	0.0182	1.730	0.1623
Composição -Tempo	4	0.4473	0.1118	10.650	0.0000*
Minhoca-Tempo	1	0.0107	0.0107	1.016	0.3196
Comp-Minhoca-Tempo	4	0.0727	0.0105	1.730	0.1623
Erro	40	0.4200			
Total	59	2.6860			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-25 - Tabela ANOVA para densidade aparente.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	1.68792	0.42198	223.665	0.0000*
Minhoca	1	0.00000	0.00000	0.000	1.0000
Tempo	1	0.00003	0.00003	0.014	0.9060
Composição -Minhoca	4	0.00012	0.00003	0.016	0.9995
Composição -Tempo	4	0.00399	0.00100	0.529	0.7153
Minhoca-Tempo	1	0.00000	0.00000	0.000	1.0000
Comp-Minhoca-Tempo	4	0.00012	0.00003	0.016	0.9995
Erro	40	0.07547	0.00189		
Total	59	1.76764			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-26 - Tabela ANOVA para a Parte Aérea do rabanete.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Composição	4	5.6343	1.4086	91.346	0.0000*
Minhoca	1	0.0496	0.0496	3.216	0.0772
Composição -Minhoca	4	0.1959	0.0490	3.176	0.0183*
Erro	73	1.1256	0.0154		
Total	82	7.0054			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

Tabela A-27 - Tabela ANOVA para o Bulbo do rabanete.

Fonte de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F	Pr > F
Caixa	4	1.8945	0.4736	10.278	0.0000*
Minhoca	1	0.0979	0.0979	2.125	0.1492
Caixa-Minhoca	4	0.1391	0.0348	0.755	0.5581
Erro	73	3.3641	0.0461		
Total	82	5.4956			

* indica que o valor é $< 0,05$ e portanto o efeito correspondente é significativo

8.2. Anexo B - Figuras

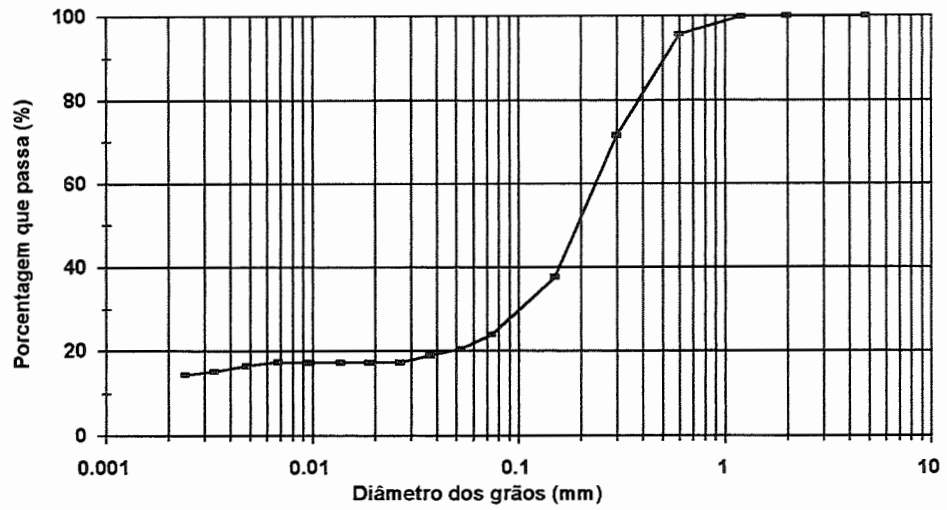
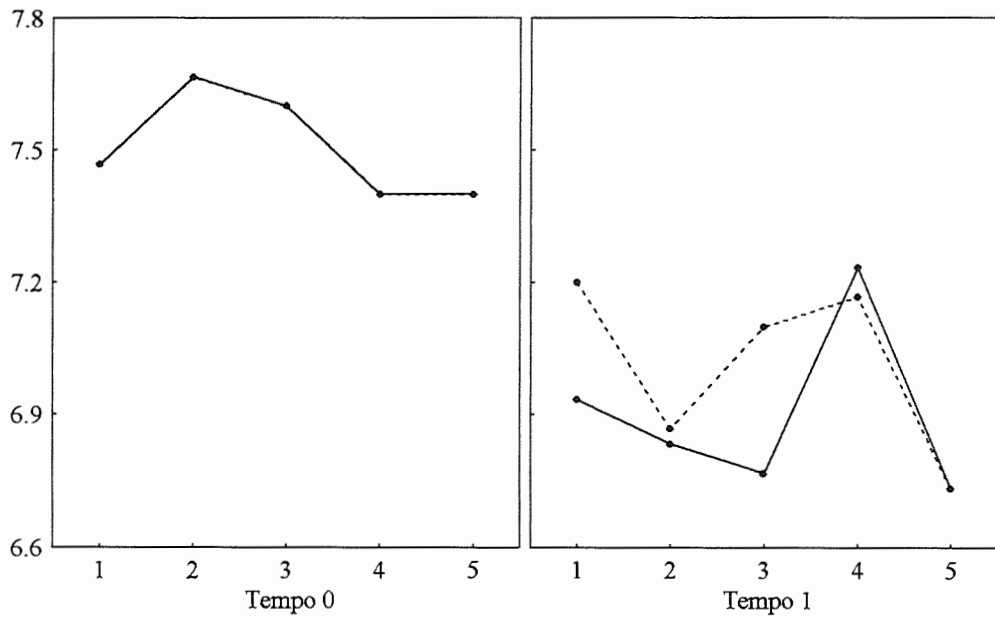


Figura B-1 - Curva granulométrica do solo.



— PRESENÇA DE MINHOCAS EIXO X = COMPOSIÇÃO
 - - - AUSÊNCIA DE MINHOCAS EIXO Y = pH

OBS: A média para pH só foi calculada porque o erro cometido com este procedimento foi pequeno devido a pequena variação dos valores medidos para as repetições de uma mesma composição.

Figura B-2 - Médias para o pH.

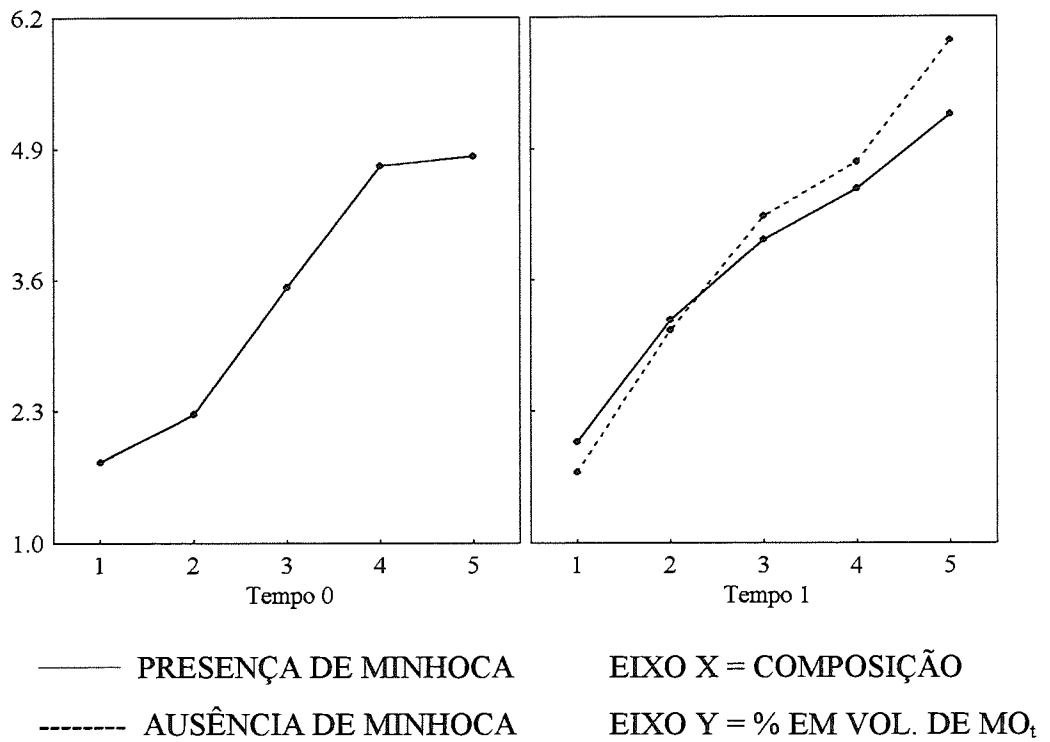


Figura B-3 - Médias para porcentagem em volume de matéria orgânica total.

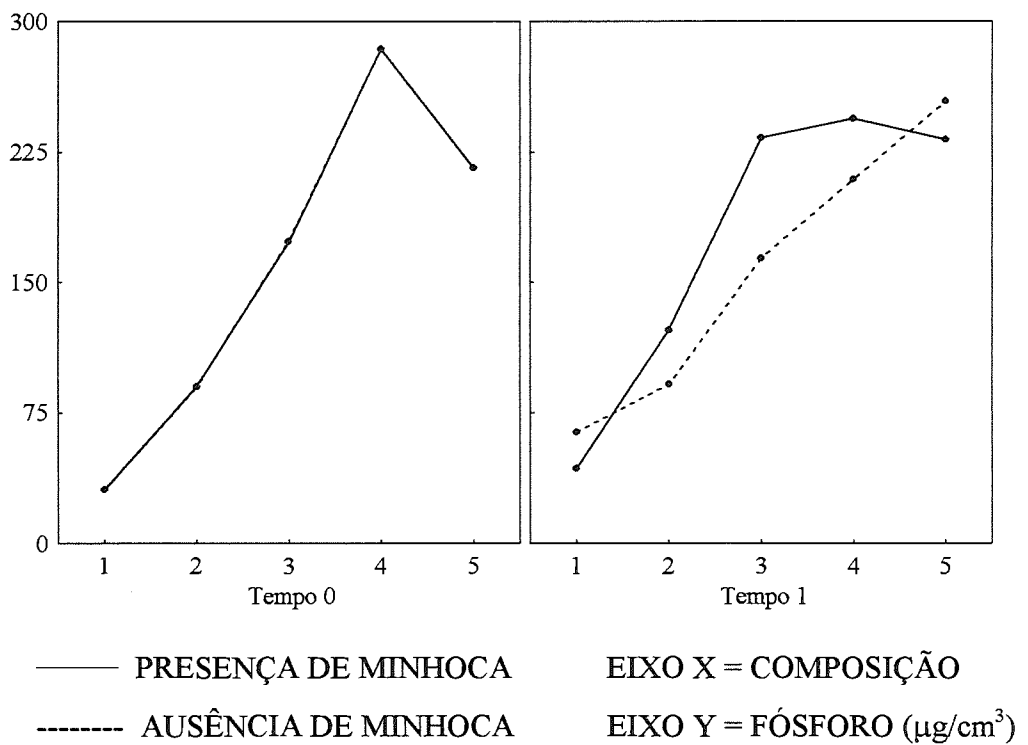


Figura B-4 - Médias para as concentrações de fósforo.

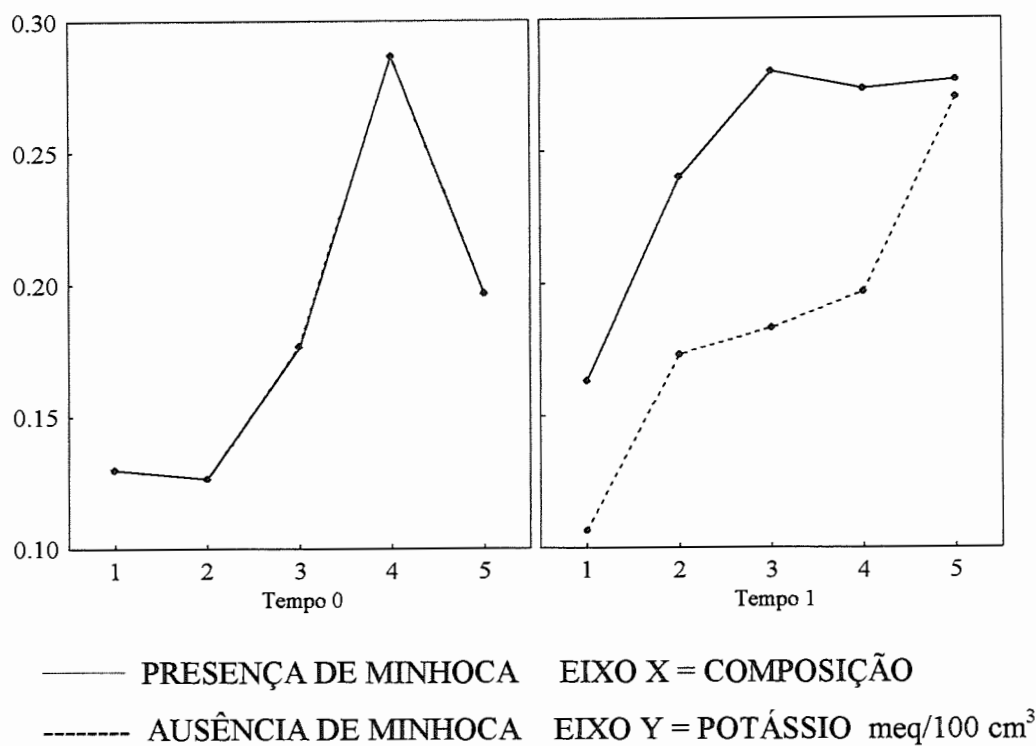


Figura B-5 - Médias para as concentrações de potássio.

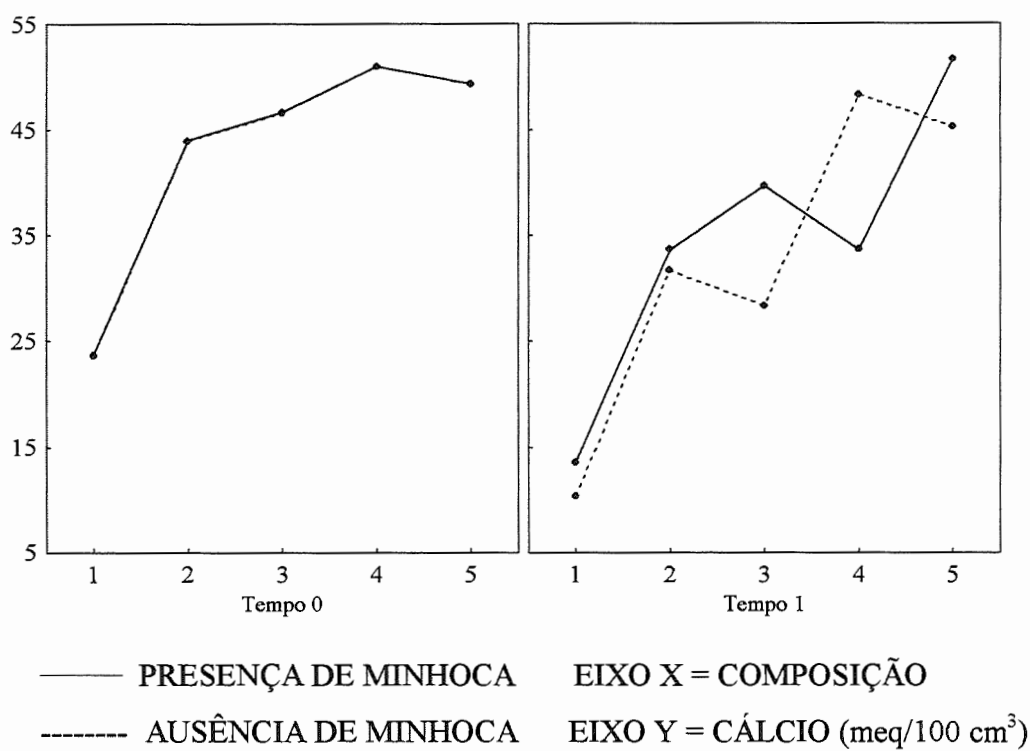


Figura B-6 - Médias para as concentrações de cálcio.

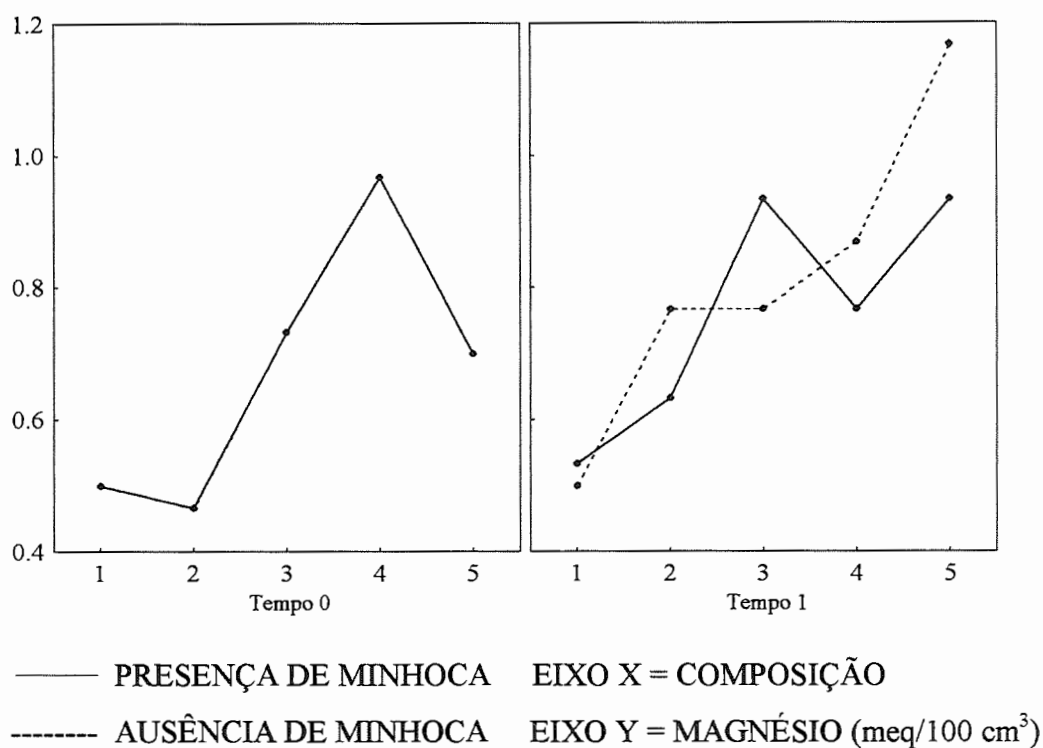


Figura B-7 - Médias para as concentrações de magnésio.

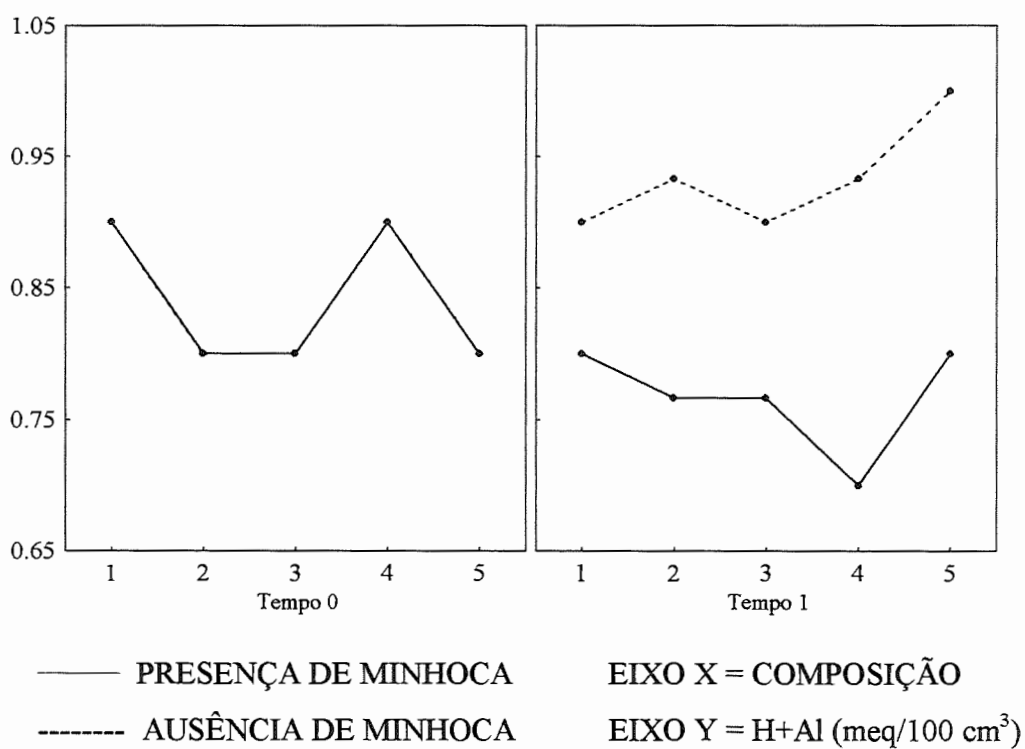


Figura B-8 - Médias para as concentrações de hidrogênio mais alumínio.

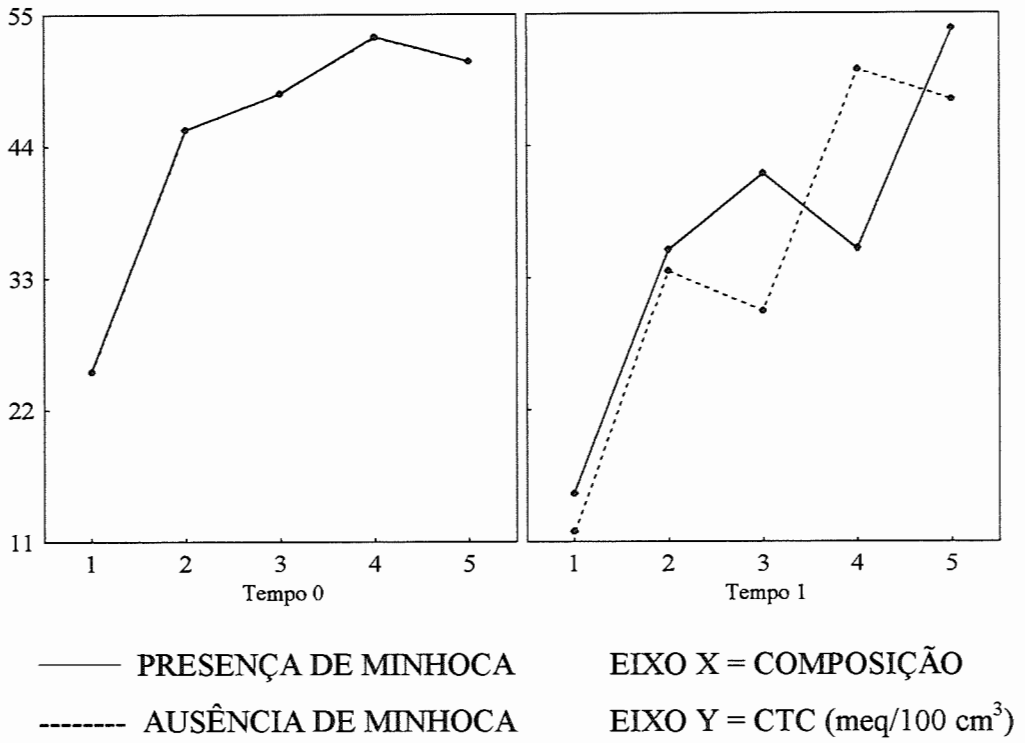


Figura B-9 - Médias para a capacidade de troca catiônica.

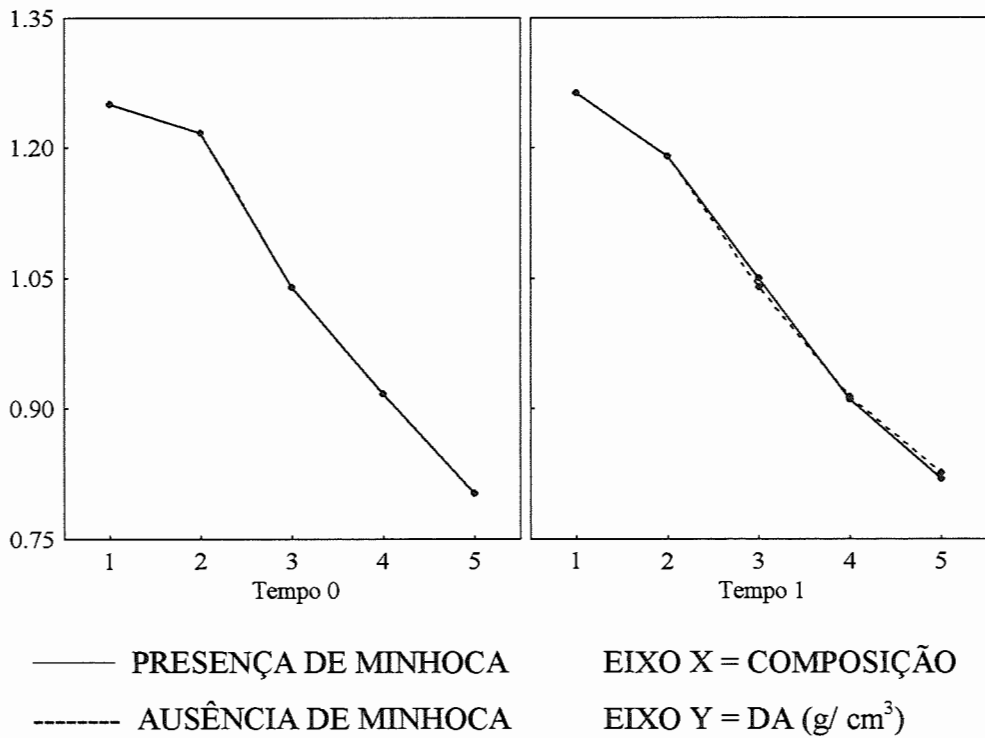


Figura B-10 - Médias para a densidade aparente.

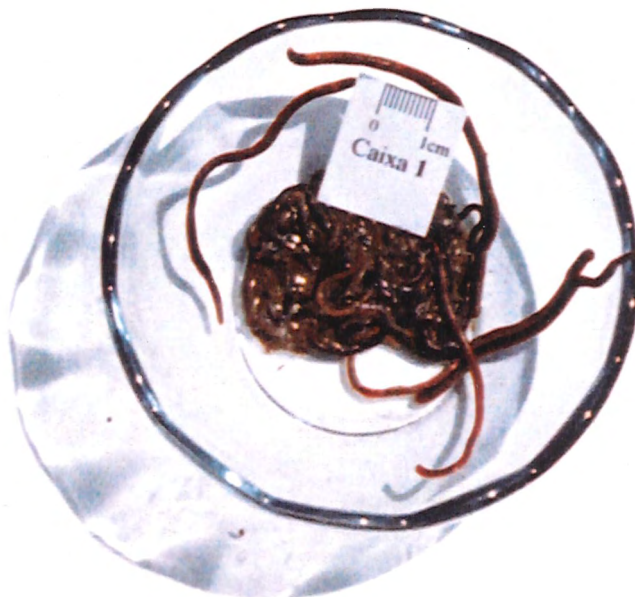


Figura B-11 - Minhocas retiradas da composição 1 no final do processo.



Figura B-12 - Minhocas retiradas da composição 2 no final do processo.



Figura B-13 - Minhocas retiradas da composição 3 no final do processo.



Figura B-14 - Minhocas retiradas da composição 4 no final do processo.



Figura B-15 - Minhocas retiradas da composição 5 no final do processo.



Figura B-16 - Rabanetes produzidos na composição 1.



Composição 2: 75% de solo + 25% de lodo.
 0 = composição 2 não vermicompostada.
 1 = composição 2 vermicompostada.

Figura B-17 - Rabanetes produzidos na composição 2.



Composição 3: 50% de solo + 50% de lodo.
 0 = composição 3 não vermicompostada.
 1 = composição 3 vermicompostada.

Figura B-18 - Rabanetes produzidos na composição 3.



Composição 4: 25% de solo + 75% de lodo.

0 = composição 4 não vermicompostada.

1 = composição 4 vermicompostada.

Figura B-19 - Rabanetes produzidos na composição 4.



Composição 5: 100% de lodo.

0 = composição 5 não vermicompostada.

1 = composição 5 vermicompostada.

Figura B-20 - Rabanetes produzidos na composição 5.

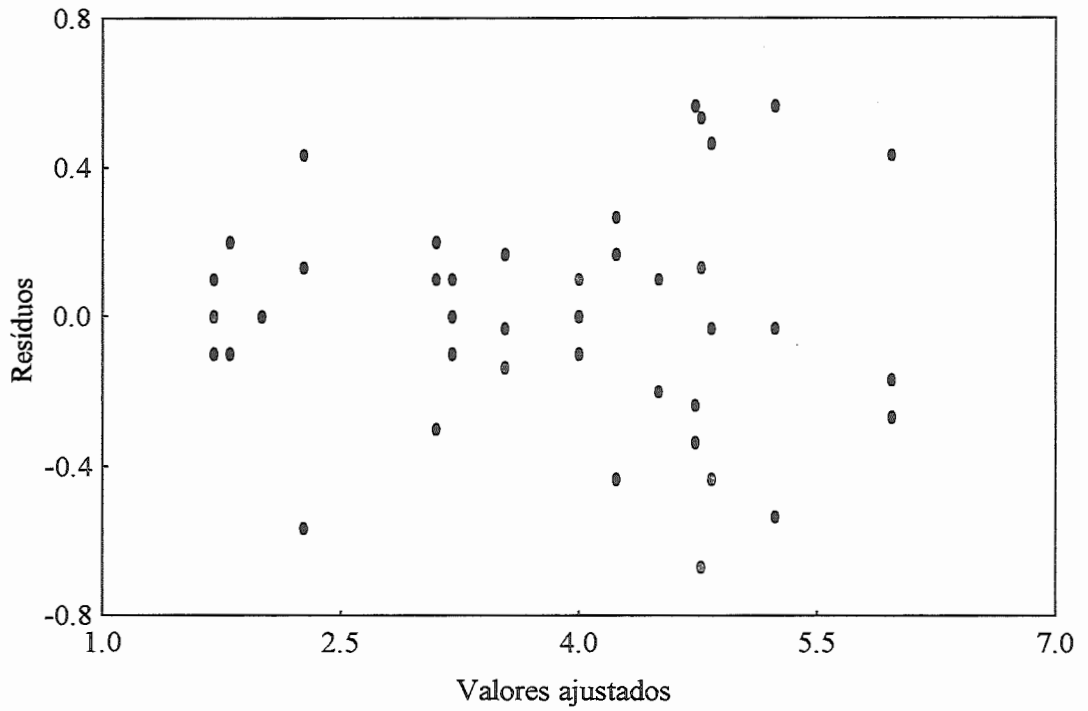


Figura B-21 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para MO.

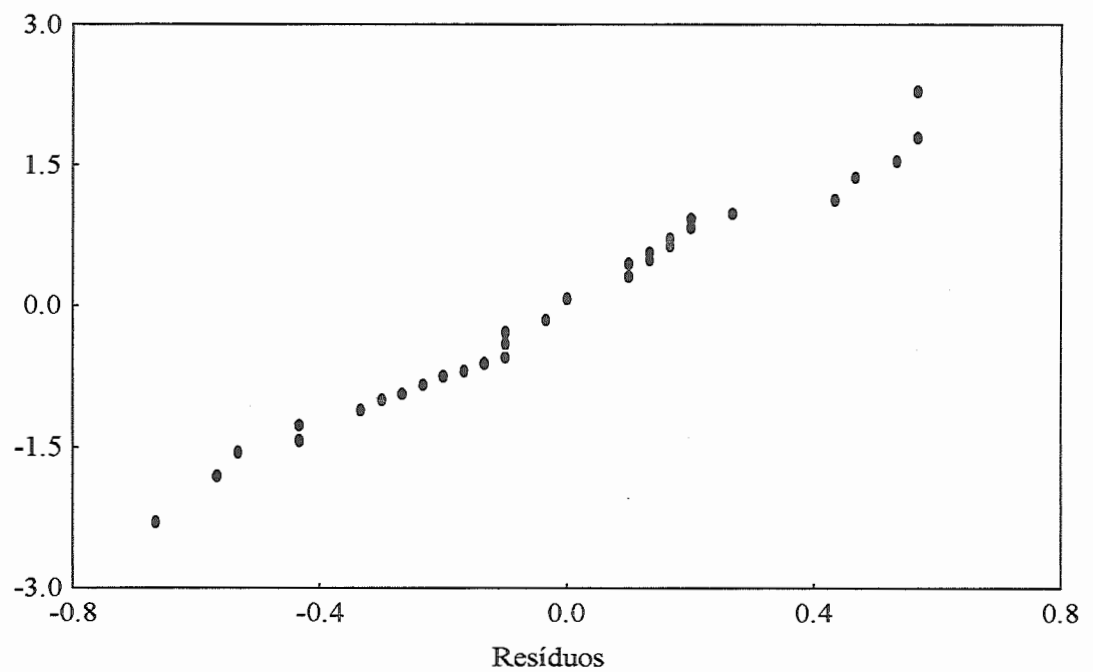


Figura B-22 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a MO.

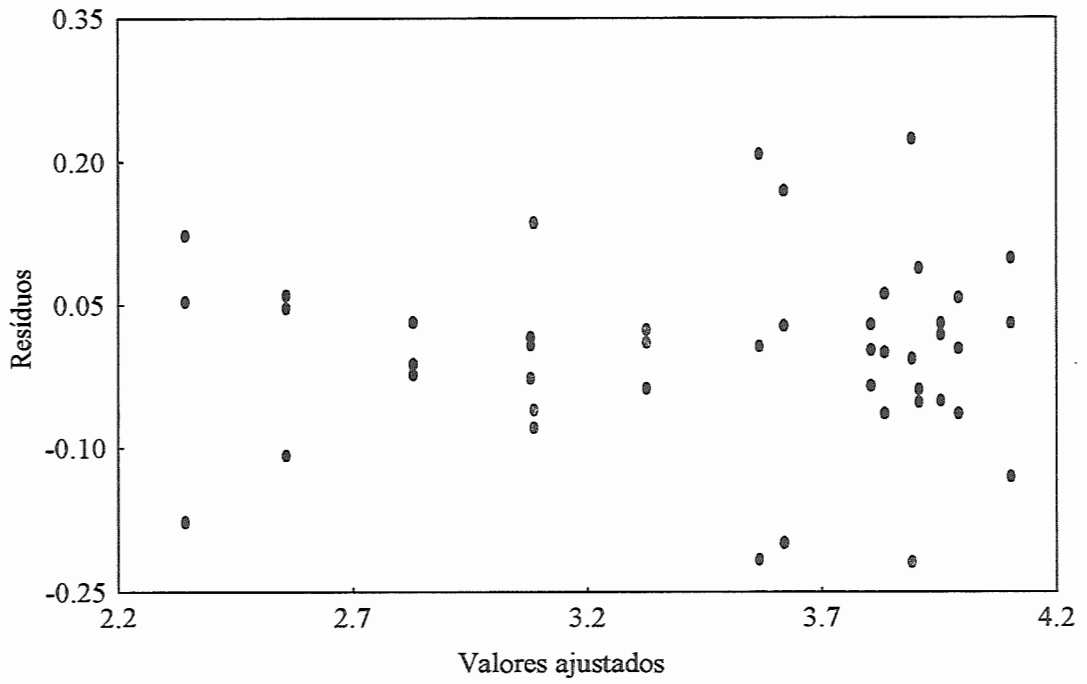


Figura B-23 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o fósforo.

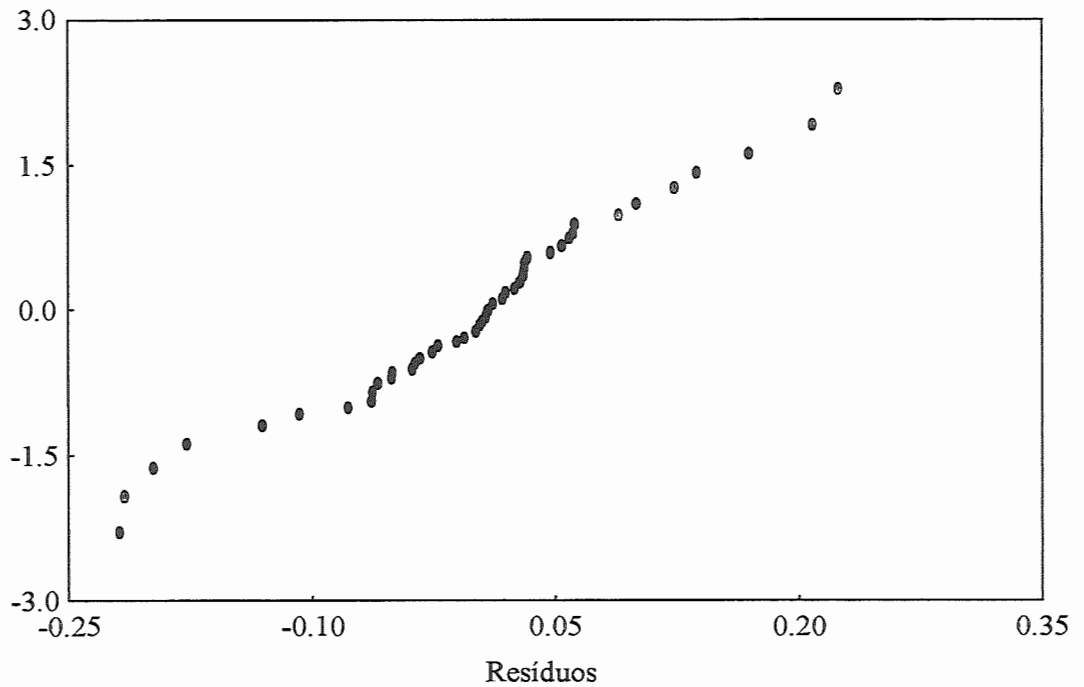


Figura B-24 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o fósforo.

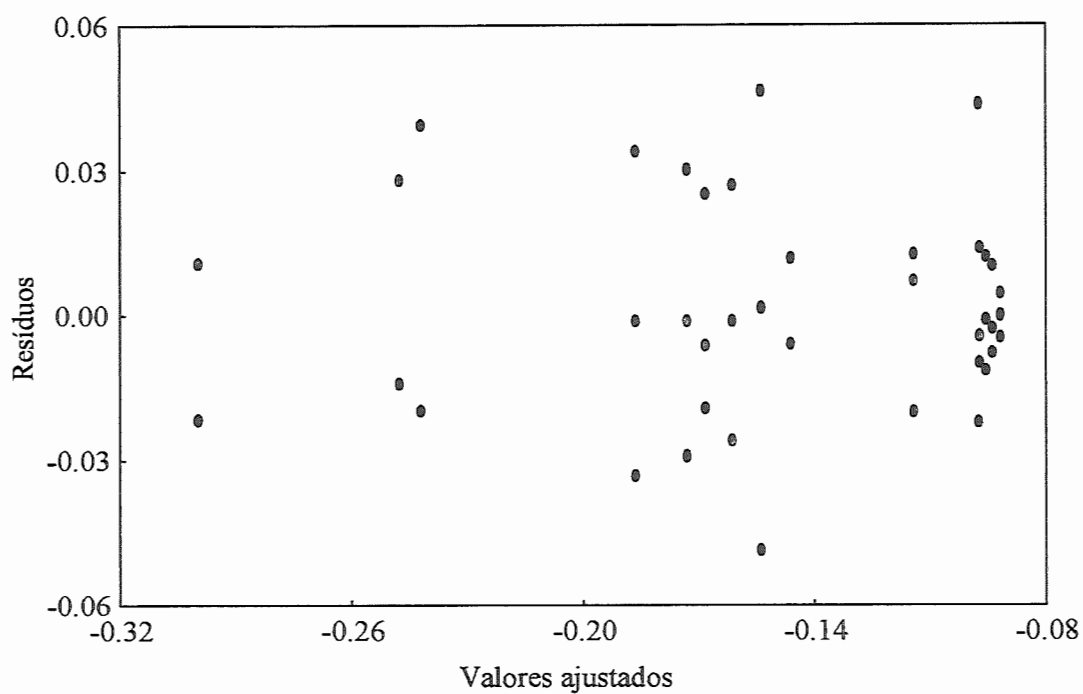


Figura B-25 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o potássio.

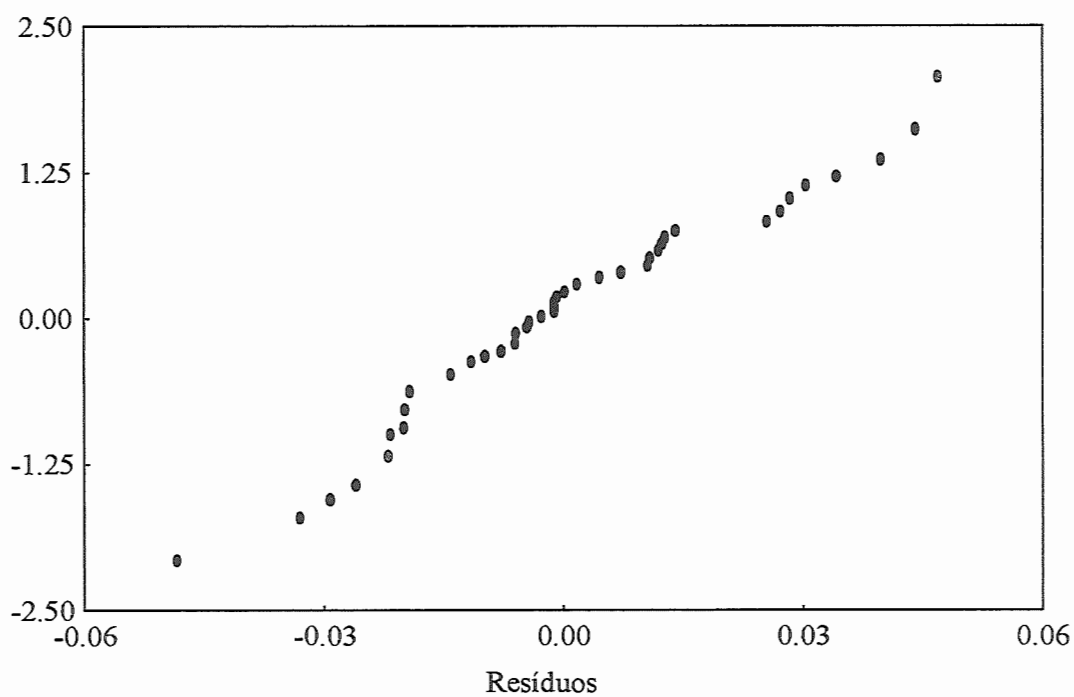


Figura B-26 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o potássio.

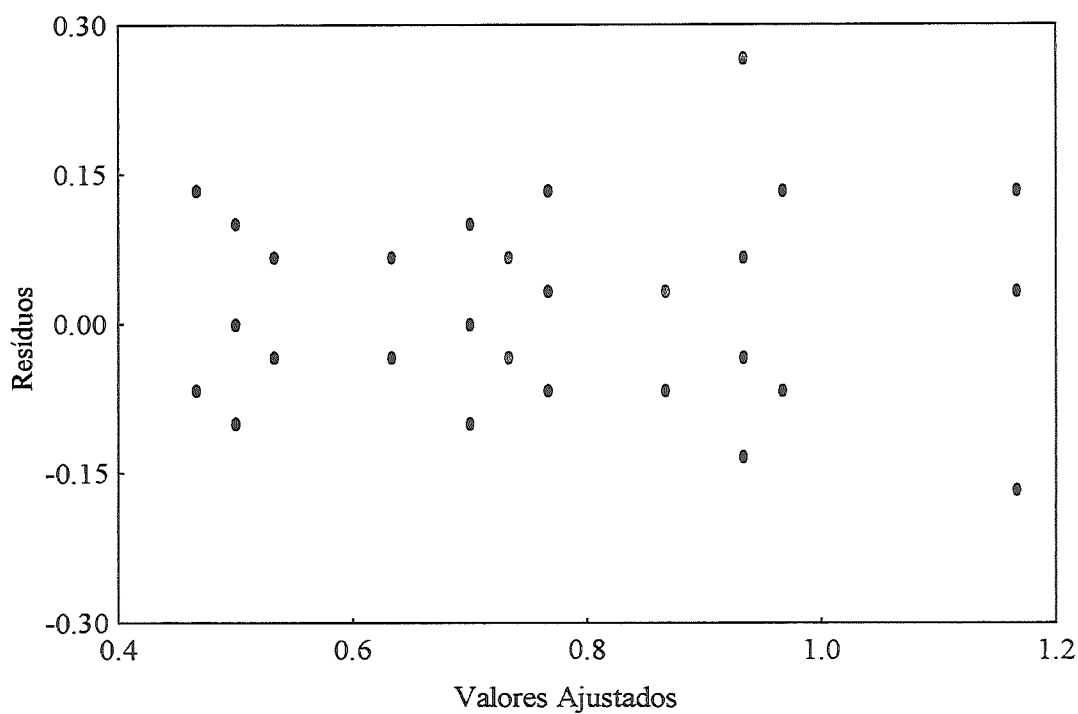


Figura B-27 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o magnésio.

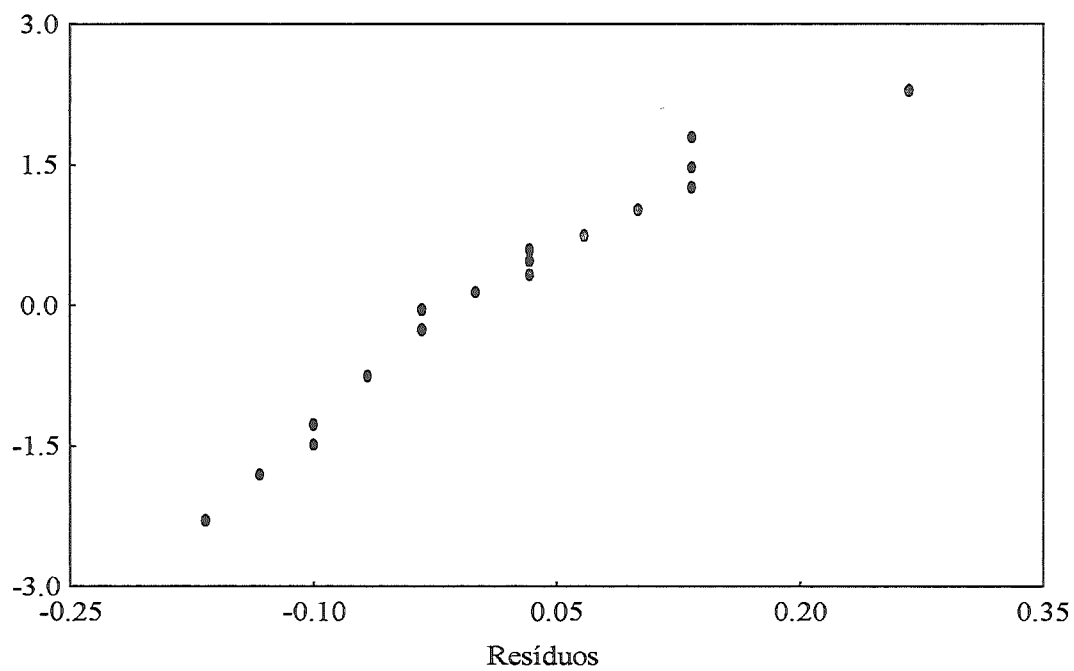


Figura B-28 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o magnésio.

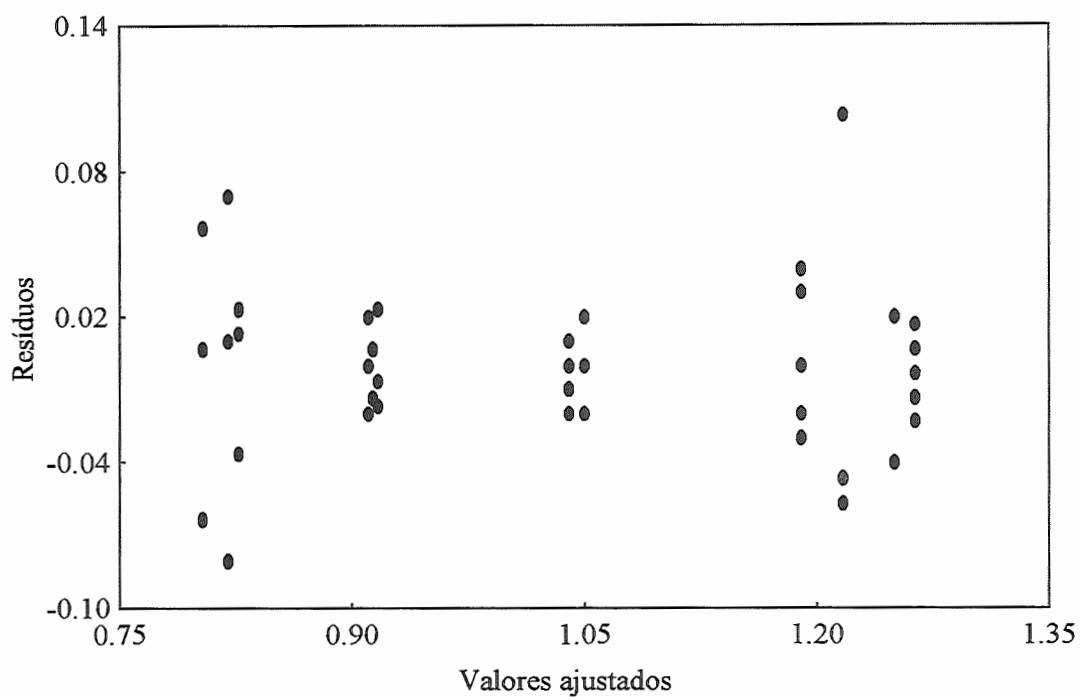


Figura B-29 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para a densidade aparente.

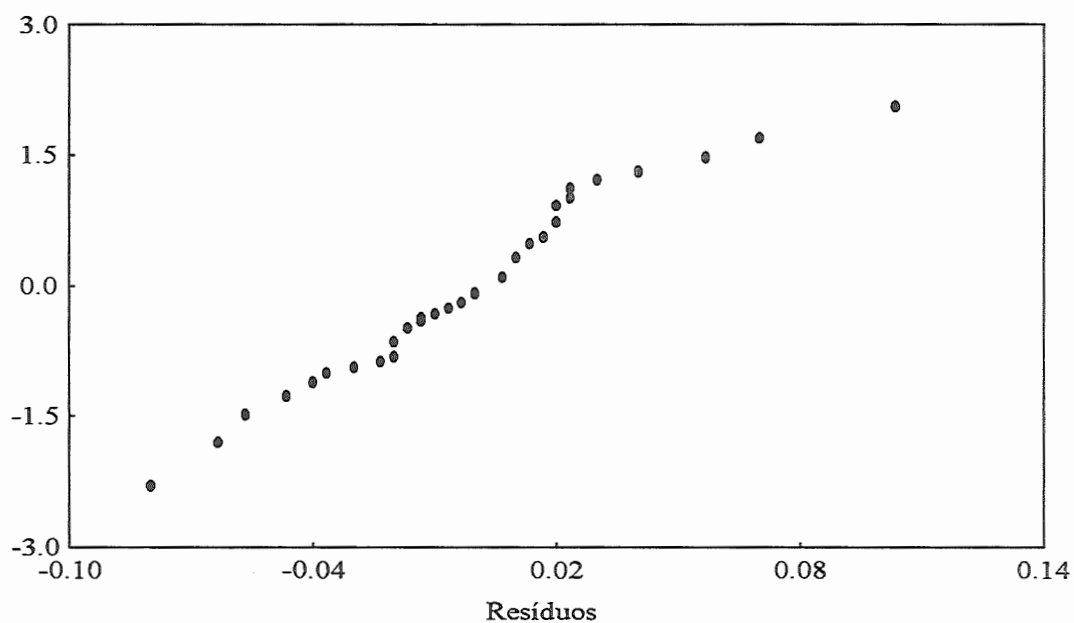


Figura B-30 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a densidade aparente.

tempo 0 (início)	minhoca	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	composição	5	5	4	4	1	1	3	3	2	2
<hr style="width: 60%; margin: auto;"/>											
tempo 1 (final)	minhoca	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
	composição	3	2	5	2	5	1	3	4	1	4
<hr style="width: 60%; margin: auto;"/>											
minhoca 0 = ausência						minhoca 1 = presença					

Figura B-31 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para pH.

tempo	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1
composição	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5
<hr style="width: 60%; margin: auto;"/>										
tempo 0 = início					tempo 1 = 75 dias depois					

Figura B-32 - Comparações múltiplas de Duncan para MO.

Tempo 0 (início)	Minhoca	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1
	composição	1	1	2	2	3	3	5	5	4	4
<hr style="width: 60%; margin: auto;"/>											
Tempo 1 (final)	Minhoca	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
	composição	1	1	2	2	3	4	5	3	4	5
<hr style="width: 60%; margin: auto;"/>											
minhoca 0 = ausência						minhoca 1 = presença					

Figura B-33 - Comparações múltiplas de Duncan para o fósforo.

tempo	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1
composição	2	1	1	3	5	2	3	4	4	5
tempo	0	0	1	1						
minhoca	0	1	0	1						
<p>minhoca 0 = ausência tempo 0 = início</p> <p>minhoca 1 = presença tempo 1 = 75 dias depois</p>										

Figura B-34 - Comparações múltiplas de Duncan para o potássio.

tempo 0	minhoca	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
(início)	composição	1	1	2	2	3	3	5	5	4	4
tempo 1	minhoca	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0
(final)	composição	1	1	3	2	5	2	4	3	5	4
<p>minhoca 0 = ausência minhoca 1 = presença</p>											

Figura B-35 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para o cálcio.

tempo	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1
caixa	2	1	1	5	2	3	4	3	4	5
<p>tempo 0 = início tempo 1 = 75 dias depois</p>										

Figura B-36 - Comparações múltiplas de Duncan para o magnésio.

tempo 0 (início)	minhoca	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	composição	2	2	3	3	5	5	1	1	4	4
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>											
tempo 1 (final)	minhoca	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
	composição	4	3	2	5	1	1	3	2	4	5
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>											
minhoca 0 = ausência						minhoca 1 = presença					

Figura B-37 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para hidrogênio + alumínio

tempo 0 (início)	minhoca	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
	composição	1	1	2	2	3	3	5	5	4	4
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>											
tempo 1 (final)	minhoca	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0
	composição	1	1	3	2	2	4	3	5	5	4
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>											
minhoca 0 = ausência						minhoca 1 = presença					

Figura B-38 - Comparações múltiplas de Wilcoxon para a CTC.

Composição	5	4	3	2	1
<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>					

Figura B-39 - Comparações múltiplas de Duncan para densidade aparente.

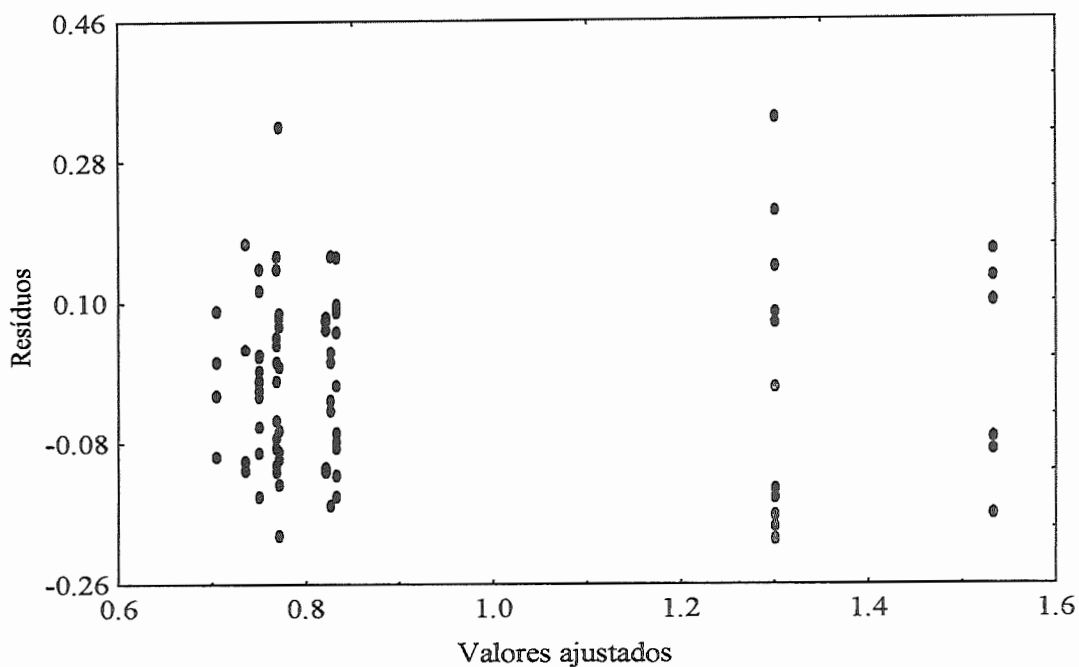


Figura B-40 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para a parte aérea.

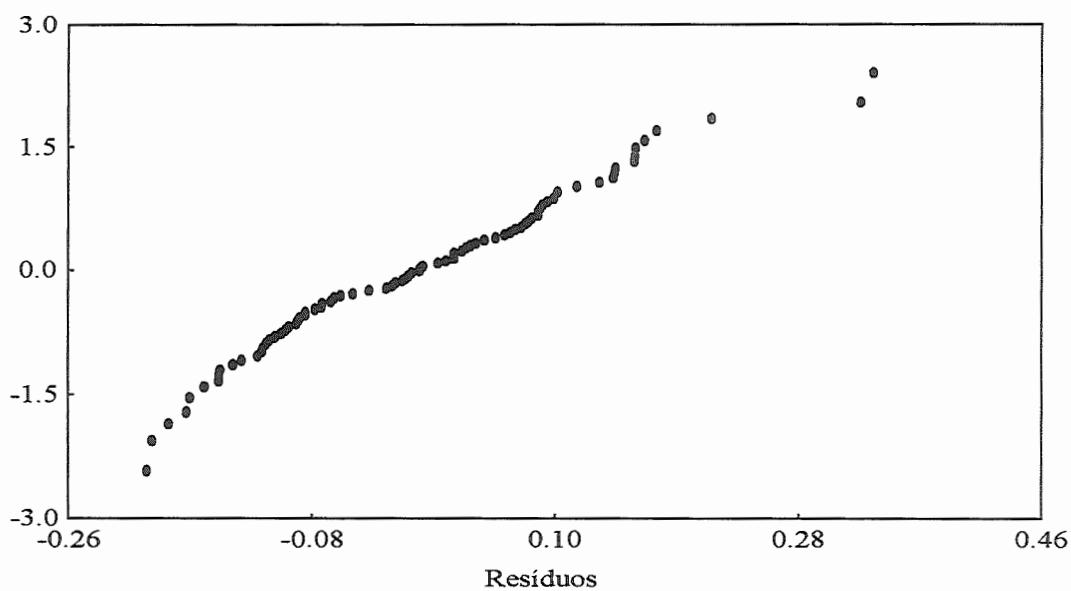


Figura B-41 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para a parte aérea.

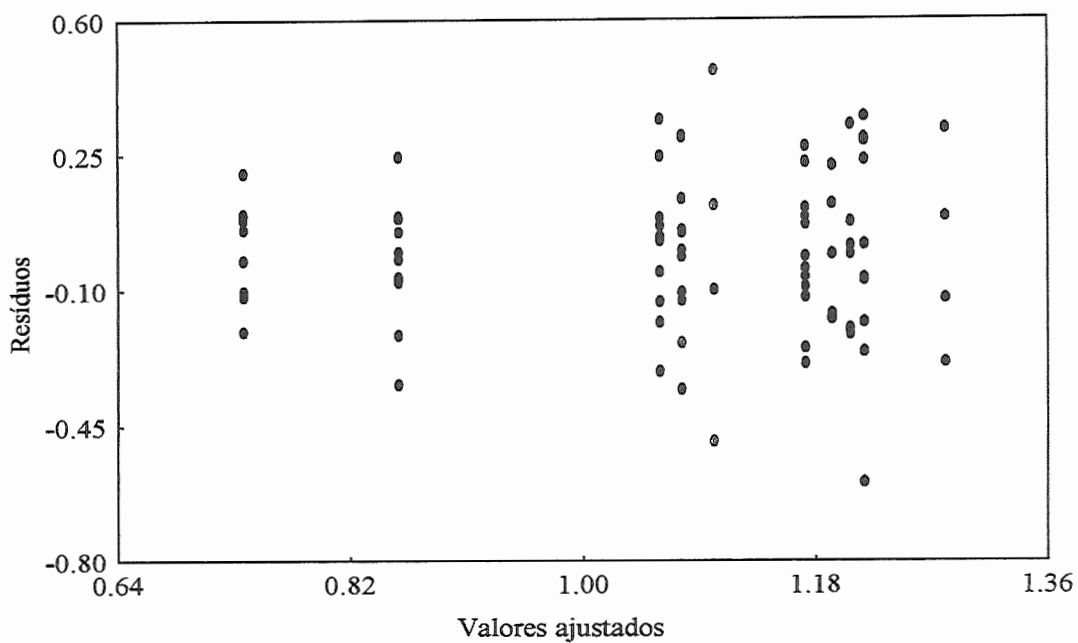


Figura B-42 - Avaliação gráfica da homocedasticidade dos resíduos para o bulbo.

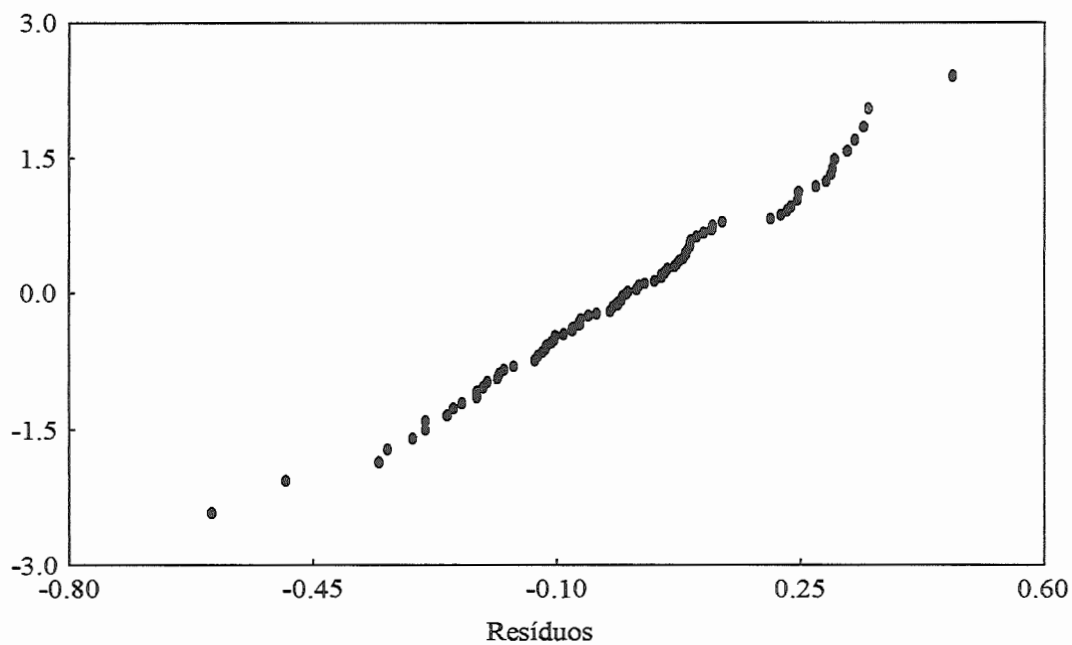


Figura B-43 - Avaliação gráfica da normalidade dos resíduos para o bulbo.

minhoca	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0
composição	1	1	2	2	3	4	3	5	4	5
<p>tempo 0 = início tempo 1 = 75 dias depois</p>										

Figura B-44 - Comparações múltiplas de Duncan para Parte Aérea dos rabanetes.

Composição	1	3	2	4	5
<p>tempo 0 = início tempo 1 = 75 dias depois</p>					

Figura B-45 - Comparações múltiplas de Duncan para o Bulbo dos rabanetes.

