

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**REMOÇÃO DE METAIS DE LODO DE ESGOTO
POR BIOLIXIVIAÇÃO VISANDO A
SUA UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA**

Rosiléa Garcia França

**Campinas
2003**

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

REMOÇÃO DE METAIS DE LODO DE ESGOTO
POR BIOLIXIVIAÇÃO VISANDO A
SUA UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA

Rosiléa Garcia França

Orientador: Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo

*Atesto que esta é
a versão definitiva
da tese.*

17/3/03

[Assinatura]
orientador

Tese de doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos pré-requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Saneamento e Ambiente.

Campinas, SP
2003

22-04943

UNIDADE	00
Nº CHAMADA	UNICAMP F844r
V	EX
TOMBO BC/	54706
PROC.	16-124103
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/07/03
Nº CPD	

CM00186763-4

IB ID 295548

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F844r França, Rosiléa Garcia
Remoção de metais de lodo de esgoto por biolixiviação
visando a sua utilização agrícola / Rosiléa Garcia França. -
-Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Roberto Feijó de Figueiredo.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Metais. 2. Águas residuais. 3. Lixiviação
Bacteriana. 4. Agricultura. I. Figueiredo, Roberto Feijó.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**REMOÇÃO DE METAIS DE LODO DE ESGOTO POR
BIOLIXIVIAÇÃO VISANDO A SUA UTILIZAÇÃO AGRÍCOLA**

Rosiléa Garcia França

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo
Presidente e Orientador/FEC/UNICAMP

Prof. Dr. Oswaldo Garcia Júnior
IQ/UNESP/Araraquara

Prof. Dr. Jacir Dal Magro
CCAA/UNOCHAPECÓ

Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho
FEC/UNICAMP

Prof. Dr. José Roberto Guimarães
FEC/UNICAMP

Pesquisador Dr. Ronaldo Stefanutti
PROSAB/FEC/UNICAMP

Campinas, 13 de fevereiro de 2003

DEDICATÓRIA

Ao meu esposo Guilherme, pelo amor, companheirismo e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais Léa e Orlando, meus irmãos (Giovani e Flávio) e minha tia Cléia, pelo incentivo em todos os momentos no decorrer destes anos.

AGRADECIMENTOS

À Ele, pois “Tudo posso naquele que me fortalece”.

Ao Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo, pela sua orientação, conhecimento e amizade no decorrer deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho, pelo carinho e amizade.

Ao Prof. Dr. Oswaldo Garcia Júnior, por estar sempre disposto a me ajudar na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Jacir Dal Magro, pela amizade e confiança.

Aos professores Tuca e Edinho, pela amizade e conhecimento.

À Faculdade de Engenharia Civil (Departamento de Saneamento e Ambiente).

Aos meus sogros, Pedro e Regina, pelo incentivo dado durante este trabalho.

À amiga Carla, por tantas alegrias e tristezas compartilhadas durante tantos anos de convívio.

Aos amigos, Rodi e Chris, por toda amizade e apoio nos momentos mais difíceis.

À Liane, por cuidar com tanto carinho da minha casa.

À amiga Rosângela, pelo carinho e paciência.

Aos motoristas, Saul e Aguinaldo, pela amizade e ajuda durante todas as coletas.

Aos amigos do Laboratório de Saneamento e Ambiente, Marta, Marco, Patrícia, Edmar, Alexandre, Osvaldo, Gustavo, Renata, Angela, Ronaldo, Luís, Carol, Sandra, Serginho, Fábio, Oba, pelo carinho e amizade.

Aos novos amigos, Claudia, Pati, Bel, Susi, Éder, Chris, Dinho, Daniela, Lydi, Vivien, Neuza, Raquel, pelo grande carinho.

Aos amigos do Laboratório de Bioprocessos, Helen, Fifa, Luciano, Márcio, Lia e Li, pelo carinho e pelo empréstimo de tantos equipamentos.

Ao pessoal do Laboratório de Tratamento de Efluentes, da Faculdade de Engenharia de Alimentos, pelo uso do laboratório.

À minha saudosa república, a qual era composta pelos amigos Dani, Lu, Alle, Cacá e Carla, por tantos momentos juntos.

A todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Civil, em especial a Noemia, que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pela bolsa de estudo que me foi concedida.

Enfim, às demais pessoas que não foram citadas aqui mas que de alguma forma contribuíram para a realização desta conquista.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE FIGURAS	xxiii
RESUMO	xxvii
SUMMARY	xxix
1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	05
2.1 Objetivo geral	05
2.2 Objetivos específicos	05
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
3.1 Tratamento do esgoto	08
3.2 Alternativas para a disposição final do lodo de esgoto	09
3.2.1 Aterro sanitário	09
3.2.2 Incineração	10
3.2.3 <i>Landfarming</i>	10
3.2.4 Reciclagem agrícola	11
3.3 Histórico do estudo do uso agrícola do lodo de esgoto no Brasil	12
3.4 Impactos ambientais da reciclagem agrícola do lodo de esgoto	14
3.4.1 Impactos positivos	15
3.4.2 Impactos negativos	16
3.5 Metais no lodo de esgoto	17
3.5.1 Efeitos de alguns metais sobre a saúde humana	18
3.6 Legislação ambiental para aplicação do uso agrícola do lodo de esgoto	18
3.7 Remoção de metais no lodo de esgoto	21
3.7.1 Métodos químicos	22

3.7.2 Biolixiviação	22
3.8 Eficiência da biolixiviação de metais no lodo de esgoto	24
3.9 Culturas aptas a receberem o lodo de esgoto	26
3.9.1 Cultura de feijão	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 Metodologia de campo	31
4.1.1 Fonte de amostras de lodo	31
4.1.2 Estratégia amostral de lodo	31
4.2 Metodologia de laboratório	33
4.2.1 Processamento da amostra de lodo para a análise de metais	33
4.2.2 Crescimento dos microrganismos <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> e <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	34
4.2.2.1 Crescimento do microrganismo <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	35
4.2.2.2 Crescimento do microrganismo <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	36
4.2.3 Experimento para remoção de metais no lodo de esgoto	36
4.2.4 Plantio de feijão	38
4.2.4.1 Processamento da amostra de feijão	40
4.2.5 Análise química do solo	40
4.3 Metodologia analítica	41
4.3.1 Confiabilidade dos resultados	41
4.3.2 Análise de metais por Espectrometria de Absorção Atômica por Chama	42
4.3.2.1 Preparo das soluções padrões	42
4.3.2.2 Procedimento de Calibração	42
4.3.2.3 Determinação do teor de metais na porção sólida do lodo e no feijão	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri	45
5.2 Teor de metais no material de referência internacional MESS-1	49
5.3 Crescimento dos microrganismos <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> e <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	50
5.4 Experimento de remoção de metais no lodo digerido	52

5.4.1 Caracterização química do lodo tratado biologicamente e do lodo bruto	52
5.4.2 Variação do pH do lodo durante o processo de biolixiviação	54
5.5 Teor de metais no sobrenadante do lodo	54
5.6 Teor de metais na porção sólida do lodo	58
5.6.1 Primeiro experimento de biolixiviação de metais no lodo	59
5.6.2 Segundo experimento de biolixiviação de metais no lodo	61
5.6.3 Terceiro experimento de biolixiviação de metais no lodo	63
5.7 Eficiência da biolixiviação de metais na porção sólida do lodo após 12 dias de processo	66
5.8 Avaliação da planta teste feijão	71
5.8.1 Produtividade da semente de feijão	71
5.8.2 Teor de metais na semente de feijão	72
5.8.3 Teor de metais na folha de feijão	73
5.8.4 Teor de metais na raiz e no caule de feijão do terceiro experimento	74
5.8.5 Teor de metais na água percolada durante os plantios	75
5.9 Análise química do solo	75
5.9.1 Matéria orgânica	76
5.9.2 Fósforo	77
5.9.3 Potássio	78
5.9.4 Cálcio e Magnésio	78
5.9.5 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	80
6. CONCLUSÕES	83
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXO A – Teor de metais na porção sólida do lodo na primeira biolixiviação	95
ANEXO B – Teor de metais na porção sólida do lodo na segunda biolixiviação	103
ANEXO C – Teor de metais na porção sólida do lodo na terceira biolixiviação	117
ANEXO D – Curva de calibração (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco)	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Produção e formas de disposição final do lodo de ETE na Europa (x 1000 t/ano na base seca)	11
Tabela 3.2 - Comparação do nível de nutrientes entre fertilizantes químicos convencionais e lodo de esgoto	15
Tabela 3.3 - Resultados comparativos de alguns parâmetros para diversos resíduos orgânicos	16
Tabela 3.4 - Principais metais encontrados nos lodos de esgotos provenientes de atividades industriais	17
Tabela 3.5 - Síntese dos efeitos de alguns metais sobre a saúde humana	18
Tabela 3.6 - Comparação dos limites de qualidade dos lodos de esgotos estabelecidos pela USEPA 40 CFR Parte 503 e pela Diretriz da União Européia (86/278/EEC)	21
Tabela 3.7 - Teor de metais no lodo de esgoto depois de 12 dias de biolixiviação	25
Tabela 3.8 - Porcentagem máxima de remoção do teor de metais após 12 dias de biolixiviação no lodo de Québec, Canadá	25
Tabela 3.9 - Teor de metais em semente de feijão	28
Tabela 3.10 - Teor máximo permitido de metais em semente de feijão	29
Tabela 4.1 - Quantidade de lodo e de adubo mineral utilizados nos reatores	39
Tabela 4.2 - Condições operacionais do espectrofotômetro de absorção atômica	43
Tabela 5.1 - Teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri (dados fornecidos pela SABESP)	45
Tabela 5.2 - Teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri (dados obtidos nesta pesquisa)	46
Tabela 5.3 - Teor máximo de metais no lodo de esgoto utilizado na agricultura em diversos países	48

Tabela 5.4 - Teor de metais no material de referência internacional MESS-1.....	49
Tabela 5.5 - Caracterização química do lodo tratado biologicamente e do lodo bruto	52
Tabela 5.6 - Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no primeiro experimento	55
Tabela 5.7 - Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no segundo experimento	55
Tabela 5.8 - Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no terceiro experimento	56
Tabela 5.9 - Teor de metais no sobrenadante do lodo tratado biologicamente em pH = 10	58
Tabela 5.10 - Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no primeiro experimento	59
Tabela 5.11 - Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no segundo experimento	61
Tabela 5.12 - Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no terceiro experimento	63
Tabela 5.13 - Porcentagem de solubilização dos metais após 12 dias de biolixiviação na porção sólida do lodo de Barueri	67
Tabela 5.14 - Porcentagem máxima de remoção do teor de metais após 12 dias de biolixiviação no lodo de Québec, Canadá	70
Tabela 5.15 - Teor de metais na semente de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente	72
Tabela 5.16 - Teores máximos de metais permitidos em semente de feijão (mg.kg ⁻¹)	72
Tabela 5.17 - Teor de metais na folha de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente	73
Tabela 5.18 - Teor de metais na raiz e no caule de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado do terceiro plantio	74
Tabela 5.19 - Análise química do solo com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado após cada plantio de feijão	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri (SP)	32
Figura 4.2 - Reatores do tipo batelada utilizados no processo de biolixiviação de metais no lodo de esgoto	37
Figura 4.3 - Corte esquemático do reator	38
Figura 4.4 - Controle de qualidade analítica para cádmio	41
Figura 5.1 - Comparação do teor de metais na porção sólida do lodo nos anos de 1998 e 1999	47
Figura 5.2 - Controle de qualidade analítica para cada metal analisado	49
Figura 5.3 - Consumo de Fe^{2+} durante o crescimento da <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	51
Figura 5.4 - Microrganismos <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> e <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	51
Figura 5.5 - Variação do pH do lodo digerido durante os experimentos de biolixiviação de metais	54
Figura 5.6 - Teor de metais no sobrenadante do lodo na primeira biolixiviação ..	56
Figura 5.7 - Teor de metais no sobrenadante do lodo na segunda biolixiviação .	57
Figura 5.8 - Teor de metais no sobrenadante do lodo na terceira biolixiviação ...	57
Figura 5.9 - Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no primeiro experimento	60
Figura 5.10 - Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no primeiro experimento	60
Figura 5.11 - Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento	62
Figura 5.12 - Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento	62

Figura 5.13 - Teor de cádmio na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento	63
Figura 5.14 - Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento	64
Figura 5.15 - Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento	65
Figura 5.16 - Teor de cádmio na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento	65
Figura 5.17 - Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na primeira biolixiviação	68
Figura 5.18 - Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na segunda biolixiviação	68
Figura 5.19 - Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na terceira biolixiviação	69
Figura 5.20 - Primeiro plantio de feijão com adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente	71
Figura 5.21 - Teor de matéria orgânica nas três análises do solo	76
Figura 5.22 - Teor de fósforo nas três análises do solo	77
Figura 5.23 - Teor de potássio nas três análises do solo	78
Figura 5.24 - Teor de cálcio nas três análises do solo	79
Figura 5.25 - Teor de magnésio nas três análises do solo	80
Figura 5.26 - Capacidade de troca catiônica nas três análises do solo	81

RESUMO

FRANÇA, Rosiléa Garcia. Remoção de metais de lodo de esgoto por biolixiviação visando a sua utilização agrícola. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 94p. Tese (Doutorado)

O presente trabalho teve por objetivo fazer a remoção de metais (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) por biolixiviação do lodo digerido anaerobiamente gerado na estação de tratamento de esgoto (ETE) de Barueri (SP), utilizando os microrganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*. Além disso, utilizar o lodo (bruto e tratado biologicamente) como fertilizante no plantio de feijão, avaliando o teor de metais em diversas partes da planta. Foram realizados três experimentos para solubilizar metais do lodo de esgoto, em reatores batelada com um volume de lodo digerido de aproximadamente 24 L em cada experimento. Os plantios foram realizados em solo do tipo Latossolo vermelho, utilizando três reatores de polietileno. Os principais resultados desta pesquisa demonstraram que: a maior solubilização para todos os metais no lodo tratado biologicamente ocorreu em aproximadamente 8 dias, logo depois a eficiência começou a diminuir, provavelmente pelo aumento do pH do meio; os metais que apresentaram maior eficiência de solubilização no lodo tratado biologicamente foram níquel e zinco, com uma média dos três experimentos de 80 e 85%, respectivamente; no lodo bruto controle, os metais que apresentaram maior solubilização durante o período de fermentação nos três experimentos foram zinco, chumbo e níquel, tendo como média 67, 42 e 41%, respectivamente; o metal que

cromo, com uma média de 22% no lodo bruto controle e 40% no lodo tratado biologicamente; o teor dos metais cádmio (primeiro e segundo plantios), cobre (em todos os plantios) e níquel (primeiro plantio) ultrapassou o teor máximo recomendado em semente de feijão quando lodo bruto foi aplicado; as análises do teor de metais na folha, no caule e na raiz da planta de feijão não apresentaram diferenças entre os fertilizantes (lodo bruto, lodo tratado biologicamente e adubo mineral) usados neste estudo.

Palavras Chave: metais, águas residuais, lixiviação bacteriana, agricultura.

SUMMARY

FRANÇA, Rosiléa Garcia. Metal removal of sewage sludge by bioleaching aiming its agricultural use. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 94p. Tese (Doutorado)

The present work had for objective to achieve metals (cadmium, lead, copper, chromium, nickel and zinc) reduction by bioleaching in the anaerobically digested sludge generated in the wastewater treatment plant of Barueri (SP), using the microorganisms *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. Also, raw and biologically treated sludge were used as fertilizer in a crop of bean, where the content of metals was evaluated in the different parts of the plant. Three experiments of sludge bioleaching were carried out in batch reactors, with an individual volume of digested sludge of approximately 24 L. The cultivation of bean was accomplished in a soil of the red latosol type contained in three polyethylene reactors. The main results of this research had demonstrated that: the highest solubilization for all metals in the biologically treated sludge occurred in approximately 8 days, followed by a decreasing efficiency, probably due to an increase of pH of the medium; the metals that presented greater efficiency of solubilization in the biologically treated sludge were nickel and zinc, with a average of the three experiments of 80 and 85%, respectively; in the control raw sludge, the metals that presented greater solubilization during the period of fermentation in the three experiments were zinc, lead and nickel, having as average 67, 42 and 41%, respectively; the metal that presented minor solubilization efficiency was the chromium, with a average of 22% in the control raw sludge and 40% in the

biologically treated sludge; the metal content of cadmium (first and second crops), copper (in all crops) and nickel (first crop) exceeded recommended maximum content in the bean seeds when raw sludge was applied; analyses of the metal content in the leaf, in the stem and in the root of the plant did not presented contamination problems when either biologically treated sludge or raw sludge were applied to the soil.

Keywords: metals, wastewater , bacterial leaching, agriculture.

1. INTRODUÇÃO

O rápido desenvolvimento urbanístico e industrial, nas últimas décadas, trouxe como uma das conseqüências o problema de poluição para os corpos d'água (DASSENAKIS *et al.*, 1996).

A Organização das Nações Unidas define poluição como sendo a introdução de substâncias ou de formas de energia, direta ou indiretamente, no meio ambiente pelo homem, resultando em efeitos prejudiciais, como danos aos recursos naturais, perigos à saúde humana, prejuízo da qualidade de uso dos recursos, comprometimento ou até impedimento das atividades. Desta forma, a poluição no ambiente natural tem repercussões sanitárias, econômicas, sociais e políticas.

Entre os tipos de poluição encontrados em todo mundo, a poluição hídrica é encarada como uma séria ameaça ao ambiente, pois dela participam despejos domésticos, industriais, agrícolas, hospitalares, entre outros.

A carência de sistemas de tratamento de esgotos domésticos e industriais, já equacionados nos países desenvolvidos, constitui-se possivelmente no principal problema de poluição das águas no Brasil. Ao final do século 20, estimava-se que pouco mais de 20% da população brasileira eram atendidas por sistema de coleta e afastamento de esgoto, sendo que menos de 10% da população tinham esgoto tratado. No Estado de São Paulo, o mais bem servido por sistemas de esgoto sanitário do país, cerca de 65% de sua população são atendidas por redes coletoras de esgotos (ALEM SOBRINHO e TSUTIYA, 1999).

Segundo FERNANDES (2000), a composição média do esgoto aponta para uma mistura de água (99,9%) e de sólidos (0,1%), sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos e gorduras, etc) e 30% inorgânicos (areia, sais, metais, etc).

Dentre os diversos poluentes citados acima, os metais encontrados em águas residuárias, oriundos principalmente de fontes industriais e domésticas, têm despertado grande interesse dos órgãos públicos no mundo todo. Isto deve-se ao fato de alguns metais serem altamente tóxicos, podendo causar efeitos sobre os ecossistemas aquáticos (UNEP, 1992).

Os metais, uma vez acumulados nos organismos em altas concentrações, podem reagir com proteínas, DNA e RNA, afetando processos metabólicos e fisiológicos e gerando danos ao ser humano que às vezes são irreversíveis (LOON, 1985).

Em geral, as estações de tratamento de esgotos (ETE) recebem os esgotos *in natura* e os submetem a uma série de processos físicos, químicos e biológicos que têm por objetivo eliminar da água contaminada as diversas substâncias indesejáveis nela contida, possibilitando o seu retorno ao ambiente com características sanitárias mais adequadas. Deve-se salientar, no entanto, que tais processos não removem a totalidade das substâncias indesejáveis.

No caso dos metais, estes podem ser removidos da água e concentrados no lodo, resíduo final do processo de tratamento. O teor de metais no lodo varia de acordo com: o tipo de processo utilizado na ETE, a presença de certo metal no processo industrial na área de interesse, a época do ano, o estilo de vida da população, entre outros.

Com o crescimento dos grandes centros urbanos e o desenvolvimento de regiões para onde vêm se dirigindo algumas indústrias, aliado à crescente

consciência ambiental, é possível prever um aumento considerável, nos próximos anos, na criação de novas ETE, com o consequente aumento na produção de lodo.

Desta forma, o lodo disposto inadequadamente, sem qualquer tratamento, também pode poluir o solo e os recursos hídricos, alterando suas características físicas, químicas e biológicas, constituindo-se num problema de ordem estética e, ainda pior, uma séria ameaça à saúde pública e ambiental. Por essas razões, a eliminação imediata dos problemas com o lodo de esgoto, desde a sua origem, seguida do tratamento e destino final, não é somente desejável, mas, mais do que necessário para sociedade (DE DEUS, 1992).

A disposição final adequada deste resíduo é uma etapa problemática no processo operacional de uma estação de tratamento de esgoto, pois seu planejamento tem sido negligenciado e apresenta um custo que pode alcançar 40% do orçamento operacional de um sistema de tratamento (ROGALLA, 1998).

As alternativas que têm sido estudadas para dispor o lodo resultante do tratamento de esgoto, são: incineração, aterro sanitário, *landfarming* e reciclagem agrícola. Opções como a incineração e a disposição em aterros sanitários requerem tecnologia sofisticada e podem apresentar alto custo por tonelada tratada (ANDREOLI e PEGORINI, 1998).

O uso do lodo de esgoto na agricultura pode tornar-se prática comum. Dependendo da origem e composição deste material, seu uso agrícola pode representar fonte de alguns nutrientes para as plantas, além de promover melhorias físicas, químicas e biológicas do solo devido ao alto teor de matéria orgânica que ele contém. Outra justificativa para a valorização agrícola do lodo é a minimização dos problemas das companhias de saneamento quanto à disposição das grandes quantidades de lodo gerado. Porém, a presença de metais em altos teores no lodo de esgoto, entre eles cádmio, chumbo, cromo, cobre, mercúrio, níquel e zinco, pode ser um fator limitante ao seu uso. Diversos autores têm chamado a atenção para as limitações quanto ao uso agrícola de lodo de esgoto devido à presença de metais,

entre eles KIM *et al.* (1988), JING e LOGAN (1992) e CHANG *et al.* (1997). A preocupação de que a aplicação de lodo de esgoto em áreas agrícolas possa introduzir metais dentro da cadeia alimentar, não depende apenas das características do lodo e das doses aplicadas, mas também das características químicas e mineralógicas dos solos.

No Brasil, a maioria dos trabalhos envolvendo o problema de metais adicionados ao solo via lodo de esgoto, restringe-se a constatar a elevação dos teores de metais no solo, ou na planta, ao se adicionar doses crescentes do lodo e comparar os resultados com os limites máximos permitidos da legislação.

TYAGI *et al.* (1991) sugeriram que a aplicação do lodo de esgoto em áreas agrícolas pode ser realizada de forma segura, protegendo tanto o ambiente como a saúde humana, desde que se faça uma redução do teor de metais neste resíduo. Vários métodos têm sido propostos para reduzir o teor de metais no lodo de esgoto, incluindo: redução na fonte, métodos químicos e biolixiviação (solubilização biológica) (TYAGI *et al.*, 1991; COUILLARD *et al.*, 1991). Este último tem sido considerado a melhor opção pois apresenta uma alta eficiência na remoção de metais, enquanto que o primeiro existe a dificuldade da identificação das fontes e o segundo por ser um método que requer muito ácido, torna esta alternativa muito onerosa.

Portanto, neste trabalho optou-se por fazer a remoção do teor de metais no lodo de esgoto por meio do processo de biolixiviação, utilizando as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*. Desta forma, a principal proposta desta pesquisa é apresentar uma alternativa para remover metais presentes no lodo de esgoto, permitindo que o mesmo seja aplicado ao solo de forma segura, sem prejuízos ao ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo foi avaliar a remoção de metais (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) no lodo digerido anaerobiamente gerado na estação de tratamento de esgoto (ETE) de Barueri (SP) por biolixiviação.

2.2. Objetivos Específicos

↳ quantificar o teor de metais no lodo bruto, no lodo bruto controle (sem bactérias) após 12 dias de fermentação e no lodo tratado (com duas suspensões de bactérias) após 12 dias de biolixiviação;

↳ utilizar o lodo bruto e o lodo tratado biologicamente no plantio de feijão;

↳ analisar diversas partes da planta de feijão produzido a partir do lodo de esgoto quanto ao teor de metais; e,

↳ analisar o solo em relação aos macronutrientes após o plantio de feijão.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os esgotos costumam ser classificados em dois grupos principais: domésticos ou sanitários e industriais. Os primeiros são constituídos essencialmente de despejos domésticos, uma parcela de águas pluviais e águas de infiltração. Eventualmente uma parcela de despejos industriais são misturados ao esgoto doméstico.

Os esgotos domésticos ou sanitários provêm principalmente de residências, edifícios comerciais, instituições ou quaisquer edificações que contenham instalações de banheiros, lavanderias, cozinhas, ou qualquer dispositivo de utilização da água para fins domésticos.

Os esgotos industriais, extremamente diversos, provêm de qualquer utilização da água para fins industriais, e que adquirem características próprias em função do sistema de tratamento utilizado pela empresa, do processo industrial empregado, etc. Assim sendo, cada indústria deverá ser considerada separadamente, uma vez que seus efluentes diferem até mesmo em processos industriais similares.

Os despejos industriais no Estado de São Paulo podem ser lançados na rede pública de esgotos chegando até uma estação de tratamento de esgoto sanitário, desde que atendam as normas de lançamento da legislação estadual (Decreto nº 8468/76). Muitas vezes a contribuição industrial é admitida na estação, desde que no seu planejamento e dimensionamento, os parâmetros respectivos tenham sido

levados em consideração. O lançamento indiscriminado de efluentes industriais na rede pública de esgotos sanitários pode trazer ao sistema sérios inconvenientes e alterações no seu principal subproduto que é o lodo de esgoto. Para estes casos, o mais importante seria a identificação na própria fonte, dos contaminantes presentes por meio do conhecimento do processo industrial e das fontes de geração do resíduo. Os teores de metais, especificamente, devem ser analisados criteriosamente, pois o lançamento de uma empresa pode comprometer a qualidade do lodo de toda uma cidade, tornando os custos de disposição final muito mais elevados.

Assim, cada estado, por meio de seu órgão de meio ambiente, normalmente em colaboração com a empresa estadual de saneamento, deve fixar critérios para o lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Estes critérios são diferenciados de acordo com a política do órgão estadual de meio ambiente e as condições de infra-estrutura das cidades.

3.1 TRATAMENTO DO ESGOTO

Cada método de tratamento aplicado a esgotos domésticos apresenta suas próprias características. A produção de lodo é variável segundo o tipo de tratamento. O esgoto deve ser tratado de forma a adequá-lo ao poder de diluição específico de cada corpo receptor. Estes tratamentos concentram e removem a matéria orgânica e os demais poluentes, que constituirão o lodo de esgoto. Esta decisão é de responsabilidade dos órgãos ambientais por ocasião do licenciamento, e o setor de saneamento é extremamente dependente da qualidade ambiental para a prestação de seus serviços, sendo um dos principais interesses para uma gestão ambiental eficaz. Os sistemas de tratamento de esgotos normalmente utilizam de forma otimizada, os fenômenos de biodegradação que já ocorrem na natureza. Os métodos mais comuns de tratamento são os biológicos, que utilizam os microrganismos presentes no esgoto para degradar a matéria orgânica e purificar a água. Qualquer

política de recebimento de resíduos industriais na rede deve partir de um princípio básico de jamais misturar produtos contaminados com produtos não contaminados. Uma política de gestão para a destinação de lodo, inicia com a concepção do sistema a ser escolhido. As alternativas de tratamento mais indicadas, quando pretendem reduzir a produção de lodo, são os sistemas anaeróbios, as lagoas de estabilização e o tratamento no solo, entre outros.

3.2 ALTERNATIVAS PARA A DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO DE ESGOTO

Dentre as muitas alternativas que têm sido estudadas para a disposição final do lodo podem ser citadas: aterro sanitário, incineração, *landfarming* e reciclagem agrícola. A disposição oceânica, como forma de disposição final de lodo não foi considerada, pois esse processo já não é mais utilizado por grande parte dos países e a partir de 2005 será uma prática totalmente proibida.

3.2.1 Aterro sanitário

O lodo é confinado em células previamente impermeabilizadas e recoberto com terra. A ausência de oxigênio leva a biodegradação anaeróbia, o que implica em menor velocidade de degradação da matéria orgânica e produção de metano. É uma alternativa que requer cuidadosos estudos de implantação, necessitando de dispositivos de controle ambiental avançados. O lodo uma vez disposto no aterro deve ser recoberto no mesmo dia para evitar problema de odores, atração de insetos, pássaros, etc. Os aterros produzem líquidos percolados, seja devido ao excesso de água do lodo, ou à infiltração da água da chuva. Caso este percolato atinja o lençol freático, ele pode carrear metais, contaminantes orgânicos, etc. No caso de atingir as águas superficiais, a contaminação também pode incluir nutrientes, o que provoca eutrofização das águas. Os gases resultantes da biodegradação também devem ser drenados de dentro do aterro e depois queimados ou liberados na atmosfera. A exigência de áreas para os aterros sanitários é grande. Por exemplo,

uma cidade gerando 25 t/dia de lodo em base seca (300.000 - 500.000 habitantes), dependendo da tecnologia de aterro utilizada, necessitará de 2 a 20 ha/ano para dispor seu lodo. Durante seu funcionamento, o aterro deve ter um programa de monitoramento ambiental, que deve prosseguir, inclusive, após o encerramento do aterro. A área após o encerramento pode ser utilizada para várias finalidades, tais como: parques, campos de tênis, áreas de lazer, entre outros (TSUTYA, 2000)

3.2.2 Incineração

É um método de tratamento que se utiliza da decomposição térmica via oxidação, com o objetivo de tornar um resíduo menos volumoso, menos tóxico ou atóxico, ou ainda eliminá-lo. É uma alternativa que apresenta elevado custo por tonelada tratada e problemas secundários de poluição atmosférica, restando ainda nesse processo a destinação final das cinzas. Requer cuidados operacionais sofisticados, mostrando-se mais adequada à grandes centros ou em situações onde a qualidade do lodo impede sua reciclagem agrícola, geralmente relacionado ao seu conteúdo de metais (TSUTYA, 2000).

3.2.3 Landfarming

Neste sistema uma área recebe doses elevadas de lodo por vários anos. O objetivo desta prática é utilizar o solo como um sistema de tratamento. O solo passa a ser o suporte da atividade biológica, retenção de metais, local de exposição ao sol e biooxidação, o que provocará a degradação da matéria orgânica. Neste caso não há interesse na utilização dos nutrientes do lodo. As doses de aplicação podem ser 60-70 t/ano/ha em base seca para as áreas que não tem impermeabilização da camada inferior ou de 300-600 t/ano/ha, quando o processo é feito dentro de critérios de *landfarming*, com impermeabilização da camada de solo a 60-80 cm de profundidade. O lodo deve ser misturado com a camada de solo existente na zona arável, a qual deve ser revolvida periodicamente, para facilitar os processos de

biodegradação e minimizar o problema de odor e eventual atração de moscas. É uma alternativa de baixo custo se bem instalada e monitorada, é inócua ao meio ambiente e de simples execução. Não há preocupação em reciclar os nutrientes do lodo, apenas decompor a matéria orgânica no solo. É considerada como uma boa alternativa para um plano de emergência (TSUTYA, 2000).

3.2.4 Reciclagem agrícola

O uso agrícola de lodo tem se mostrado, dentro do panorama mundial (Tabela 3.1), como uma solução adequada do ponto de vista técnico, econômico e ambiental por viabilizar a reciclagem de nutrientes, promover melhorias físicas, químicas e biológicas do solo e, principalmente, por representar uma solução para minimizar o problema da disposição das grandes quantidades de lodo gerado.

Tabela 3.1 - Produção e formas de disposição final do lodo de ETE na Europa (x 1000 t/ano na base seca)

País	Quantidade total	Uso agrícola	Aterro	Incineração	Outros usos
Áustria	170	30,6	59,5	57,8	22,1
Bélgica	59,2	17,2	32,5	8,9	0,6
Dinamarca	170,3	92	34	40,9	3,4
Finlândia	150	37,5	112,5	-	-
França	865,4	502	233,4	130	-
Alemanha	2681,2	724	1448	375,2	134
U.K.	775	488	88,6	77,4	121
Grécia	48,2	4,8	43,4	-	-
Irlanda	23,9	4,4	16,6	-	2,9
Itália	816	269,2	449	16,2	81,6
Holanda	335	87	171	10	67
Noruega	95	53,2	41,8	-	-
Espanha	315	175	122,5	17,5	-
Suécia	200	80	120	-	-
Suíça	270	121,5	81	67,5	-
Total	6974,20	2686,4	3053,8	801,4	432,6

FONTE: Adaptado de MATTHEWS, 1999 In: TSUTIYA, 2001

A reciclagem agrícola alia baixo custo e impacto ambiental positivo quando é realizada dentro de critérios seguros. Ambientalmente é a solução mais correta, pois promove o retorno dos nutrientes ao solo, colaborando para o fechamento no ciclo dos elementos. O valor do lodo como insumo agrícola, a sazonalidade das demandas e os custos envolvidos no seu beneficiamento e transporte, assim como um plano gerencial para a atividade e o monitoramento ambiental são aspectos relevantes para a análise desta alternativa. A reciclagem agrícola deve, necessariamente, estar condicionada a regras que definam as exigências de qualidade do material a ser reciclado e aos cuidados exigidos para estabilização, desinfecção e normas de utilização que incluam as restrições de uso. Assim, a regulamentação de uso é um pré-requisito básico para a utilização desta prática que apresenta grandes dificuldades para sua correta definição, de forma a garantir o uso seguro sem, contudo, inviabilizar o processo pelo excesso de exigências. As regulamentações de uso asseguram a proteção à saúde animal e humana, a qualidade das colheitas, do solo e do meio ambiente em todo o mundo. É uma alternativa particularmente promissora para países como o Brasil, onde se faz necessária à reposição do estoque de matéria orgânica dos solos devido ao intenso intemperismo das nossas condições climáticas.

3.3 HISTÓRICO DO ESTUDO DO USO AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO NO BRASIL

Como foi visto, uma das formas de destino final do lodo de esgoto de áreas urbanas é a reciclagem agrícola do mesmo. Desta forma, muitas pesquisas já foram desenvolvidas a fim de avaliar os efeitos benéficos do lodo na fertilidade do solo, na absorção de nutrientes e na produtividade de diversas culturas.

BETTIOL *et al.* (1983) em experimento com a cultura do milho, arroz e soja em vasos, analisaram a produção de matéria seca e verificaram que o lodo de esgoto pode ser utilizado na dosagem de 9 t.ha⁻¹ (base seca) como fonte de nutrientes às culturas, pois não apresentou diferença estatística quando comparado com tratamentos que receberam adubação mineral recomendada.

BERTON *et al.* (1989) aplicando doses de lodo de esgoto de 40 e 80 t.ha⁻¹ (base seca) na cultura de milho, verificaram aumentos significativos na produção de matéria seca e na absorção de nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e zinco de acordo com as doses aplicadas.

Aplicando doses crescentes de lodo de esgoto (4, 8, 16 e 32 t.ha⁻¹ com 72% de umidade), complementadas com potássio, em cultura de cana-de-açúcar, MARQUES (1990) concluiu que é possível a utilização do resíduo na cultura uma vez que não foram observadas diferenças significativas, entre os tratamentos, para produtividade e características tecnológicas desta cultura.

RADWAN (1991) avaliando o desenvolvimento de girassol em vasos contendo diferentes concentrações de lodo de esgoto, obteve aumento tanto na produção de massa seca de plantas como no número e na massa de 100 sementes quando o lodo apresentava mais que 40% do solo.

SERGIENKO *et al.* (1991) observaram a resposta da cultura do girassol à aplicação do lodo de esgoto sendo que, além do aumento de produtividade, os autores constataram aumento da fertilidade do solo.

OLIVEIRA (1995) observou aumento na produção de matéria seca por plantas de sorgo granífero pelo uso de doses de lodo de esgoto de até 20 t.ha⁻¹.

SILVA (1995) aplicou doses de lodo de esgoto (0, 20 e 40 t.ha⁻¹ com 62% de umidade) combinadas com adubação NP, NK, PK e NPK (dosagens de 60, 80 e 100 kg.ha⁻¹, respectivamente, para N, P₂O₅ e K₂O) e sem adubação na cultura de cana-de-açúcar. Os resultados demonstraram que o lodo atuou como corretivo do complexo coloidal do solo e como fertilizante para a cultura, essencialmente como fonte de cálcio, fósforo, enxofre e zinco. Esses benefícios proporcionaram aumentos lineares da produtividade de biomassa e de açúcar.

Nas culturas do feijoeiro e do milho, LOURENÇO *et al.* (1995) observaram aumento de produtividade com a utilização de doses crescentes de lodo até o máximo de 52,5 t.ha⁻¹ (85% de umidade), a partir desta dosagem as médias de produtividade começaram a diminuir.

BISCAIA e MIRANDA (1996) compararam as dosagens de 2, 4, 6 e 60 t.ha⁻¹ de lodo de esgoto (base seca) para a cultura de milho e obtiveram produtividades médias acima de 5 t.ha⁻¹ de milho com o uso desse resíduo.

CHRISTODOULAKIS e MARGARIS (1996) usando girassol em vasos compararam tratamentos sem adubação, adubação mineral recomendada e lodo de esgotos na proporção de 10 e 50% do volume em combinação com o substrato (areia). O crescimento das plantas submetidas ao tratamento com lodo de esgoto foi superior quando comparado aos tratamentos sem adubação e com adubação mineral. Além disso, os autores observaram um aumento de área foliar de até 150% em tratamento com lodo e 75% com adubação mineral em relação à testemunha.

Segundo BERTON *et al.* (1997a), a produção de matéria seca por plantas de milho cultivadas em solo que recebeu doses crescentes de lodo de esgoto (até 16 t.ha⁻¹), aumentou linearmente com a dose do fertilizante.

Com aplicação de dose de lodo de esgoto de 78 t.ha⁻¹, ANJOS (1999) verificou um aumento na produção de matéria seca das plantas de milho, entretanto não foi verificado aumento de produtividade em relação aos solos que só receberam adubação mineral.

3.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA RECICLAGEM AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO

A reciclagem agrícola do lodo de esgoto gera ao ambiente impactos tanto positivos como negativos.

3.4.1 Impactos positivos

A aplicação de lodo na agricultura e/ou florestas pode apresentar uma série de vantagens, uma vez que esse material, segundo BETTIOL (1982) e BOARETTO (1986):

- ↳ atua como fonte de nutrientes para as culturas;
- ↳ aumenta o teor de matéria orgânica no solo;
- ↳ diminui o teor de alumínio trocável;
- ↳ aumenta a produção de matéria seca e a absorção de níquel, fósforo, cálcio, magnésio e zinco;
- ↳ apresenta aumento significativo da CTC (Capacidade de Troca Catiônica) e do C-orgânico do solo; e,
- ↳ melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

O lodo apresenta um teor relativamente elevado de nitrogênio, e concentrações reduzidas de fósforo e potássio (Tabela 3.2). Portanto, o lodo de esgoto não pode ser considerado um fertilizante orgânico substituto da adubação convencional. Ele deve ser visto como um complemento desta adubação, no sentido de reduzir a utilização de fertilizantes químicos e, com isto, reduzir o custo da adubação.

Tabela 3.2 - Comparação do nível de nutrientes entre fertilizantes químicos convencionais e lodo de esgoto.

Valores Típicos	Nutrientes (%)		
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio
Fertilizantes agrícolas	5	10	10
Lodo de esgoto estabilizado	3,3	2,3	0,3

FONTE: Adaptado METCALF e EDDY, 1991

Ao comparar o lodo de esgoto com outros resíduos orgânicos, observa-se que ele apresenta teores de nitrogênio e fósforo acima dos demais (Tabela 3.3).

Tanto o lodo de esgoto como os demais resíduos orgânicos podem apresentar variações em suas composições de acordo com o local de origem, sendo que os valores apresentados não devem ser considerados como uma regra.

Tabela 3.3 – Resultados comparativos de alguns parâmetros para diversos resíduos orgânicos.

Tipo de resíduo	Parâmetros (%)			
	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Matéria Orgânica
Lodo de esgoto	6,27	8,15	0,36	51,5
Esterco de galinha	5,00	2,00	2,00	-
Húmus de minhoca	1,50	1,90	0,20	80,0
Adubo de lixo	0,70	0,56	0,68	35,0

FONTE: Adaptado CAESB, 1996

3.4.2 Impactos negativos

Os principais riscos associados à utilização agrícola do lodo referem-se: a contaminação por patógenos, a atração de insetos vetores, a emissão de odores e a contaminação por metais.

O esgoto contém uma variedade de patógenos, incluindo bactérias, vírus, parasitas e fungos, muitos dos quais sobrevivem ao tratamento do esgoto e são concentrados no lodo. Embora os processos de estabilização reduzam o número de patógenos, alguns sobrevivem e podem representar um risco à saúde humana e animal.

Alguns insetos são transmissores potenciais de agentes infectantes quando entram em contato com o homem. O aumento da frequência de insetos a locais de aplicação de lodo pode ocorrer quando o lodo não está bem estabilizado.

A emissão de odores é consequência da má estabilização do lodo, a presença de odor pode ser fator de não aceitação do produto pelos agricultores.

Os solos já contêm metais em função de sua formação geológica ou pelo aporte de insumos químicos, pesticidas e poluição atmosférica e hídrica. Deve ser considerado o efeito cumulativo no solo e a absorção de metais pelos solo e plantas.

3.5 METAIS NO LODO DE ESGOTO

Os metais presentes no lodo de esgoto são provenientes, principalmente dos efluentes industriais, porém podem advir também de águas pluviais que escorrem por superfícies metálicas, de água de lavagem de alguns metais e das canalizações, mas nestes casos, com níveis que não apresentam riscos (ANDREOLI *et al.*, 1999). Na Tabela 3.4 é apresentada a origem de alguns metais conforme a atividade industrial.

Tabela 3.4 - Principais metais encontrados nos lodos de esgotos provenientes de atividades industriais

Metal	Origem
Cádmio	Indústrias de tratamento de superfícies metálicas, plásticos, fabricação de radiadores, borracha, pigmentos, etc
Cobre	Canalizações de água quente, fábrica de fios elétricos, radiadores de automóveis e tratamento de superfícies metálicas
Cromo	Curtumes, fabricação de ligas especiais de aço, tratamento de superfícies metálicas
Chumbo	Fabricação de baterias, tintas, escoamento pluvial de vias públicas, canalizações
Níquel	Fábrica de ligas de aço especiais, recobrimento de superfícies metálicas por eletrólise; hidrogenação de óleos e substâncias orgânicas, tintas, cosméticos
Mercúrio	Produtos farmacêuticos, fungicidas, aparelhos elétricos e eletrônicos, tintas, pasta de papel, fabricação de cloretos de vinil
Zinco	Produtos farmacêuticos, fábrica de tintas, borracha, pilhas elétricas, galvanização

FONTE: Adaptado de PROSAB (1999)

3.5.1 Efeitos de alguns metais sobre a saúde humana

A presença de metais no lodo tem constituído um entrave na generalização do seu uso. Aplicações sucessivas podem conduzir ao acúmulo destes elementos no ambiente e a entrada na cadeia alimentar, através do caminho: lodo ⇒ solo ⇒ planta ⇒ animal ⇒ homem (BERTONCINI, 1997).

Os metais podem provocar graves problemas para a saúde das pessoas que os consumirem durante período prolongado ou em quantidades elevadas, pois são cumulativos no organismo. A Tabela 3.5 mostra os efeitos de alguns metais sobre a saúde humana.

Tabela 3.5 - Síntese dos efeitos de alguns metais sobre a saúde humana

Metais	Efeitos sobre a saúde humana
Cádmio	Provoca desordem gastrointestinal grave, bronquite, efizema, anemia e cálculo renal.
Chumbo	Provoca cansaço, ligeiros transtornos abdominais, irritabilidade e anemia.
Cromo	Em doses baixas causa irritação nas mucosas gastrointestinais, úlcera e inflamação da pele. Em doses altas causa doenças no fígado e nos rins, podendo levar à morte.
Mercúrio	Causa transtornos neurológicos e renais, tem efeitos tóxicos nas glândulas sexuais, altera o metabolismo do colesterol e provoca mutações

FONTE: Adaptado de PROSAB (1999)

3.6 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL PARA APLICAÇÃO DO USO AGRÍCOLA DO LODO DE ESGOTO

A humanidade desenvolveu-se nos últimos anos em função de tecnologias e sistemas de produção baseados na utilização dos recursos naturais e no despejo dos resíduos não aproveitáveis no meio ambiente. Por vários anos, o homem não

teve a preocupação em repor os recursos utilizados e em auxiliar o meio ambiente no processo de assimilação dos resíduos. Hoje, porém, o homem sabe que muitos recursos são classificados como não-renováveis, e que o meio ambiente possui um limite de assimilação. Portanto, a proteção do meio ambiente é uma condição necessária para a continuação do desenvolvimento sócio-econômico. Por proteção ambiental entende-se uma série de medidas de caráter econômico, político, social e técnico, que visam o desenvolvimento sustentável da humanidade.

Quaisquer medidas que forem tomadas, existe a necessidade de regulamentação, ou seja, a necessidade de impor normas e leis a fim de que determinados padrões e diretrizes sejam seguidos. No caso específico da disposição final do lodo de esgoto, diversos países elaboraram padrões e diretrizes para as diversas alternativas de disposição. Estes padrões e diretrizes foram elaborados de acordo com as características de cada país, e de acordo com as características físico-químicas do lodo de esgoto.

Nos Estados Unidos e nos países da União Européia existem critérios estabelecidos que orientam o uso agrícola do lodo de esgoto.

Nos Estados Unidos e nos países seguidores da norma norte-americana, tais como Austrália, os limites para os poluentes no lodo são fixados sob o conceito de administrar um risco ambiental aceitável. Procede-se à análise da exposição ao risco e da dose de resposta, caracterizando-se o risco pelas abordagens probabilística e de cálculo da concentração que causaria a primeira indicação de fitotoxicidade (SANTOS, 1998).

McBRIDE (1995) e CHANG *et al.* (1997) criticaram a regulamentação da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA 40 CFR Parte 503) de 1993 que permitiu, pela aplicação de lodo, aumentar de dez a cem ou mais vezes o teor local de metais potencialmente tóxicos em áreas agrícolas.

Na União Européia, as bases para o uso controlado de lodo na agricultura foram estabelecidas pela implementação da Diretriz da União Européia 86/278/EEC em 1989, após anos de negociação e de consideráveis pesquisas (HALL, 1998). Os limites para poluentes no lodo de esgoto baseiam-se nas concentrações de poluentes de cada região e das concentrações naturais no solo, antes da aplicação do lodo (SANTOS, 1998). Também levam em consideração a proteção da planta, do animal e da saúde humana através da cadeia alimentar solo-planta-animal, bem como inclui a redução de patógenos e restrições a seis elementos potencialmente tóxicos: cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, níquel e zinco (HALL, 1998).

Os países membros da União Européia têm liberdade de estabelecer suas próprias restrições, principalmente quanto aos valores limites para os elementos potencialmente tóxicos no lodo, no solo e nas doses de aplicação, e assim o fizeram, existindo países que adotaram níveis mais baixos (HALL, 1998).

Comparando-se os limites de aplicação de lodo nos Estados Unidos (USEPA 40 CFR Parte 503) e na União Européia (Diretriz da União Européia 86/278/EEC), Tabela 3.6, verifica-se que os limites estabelecidos pela USEPA são geralmente maiores do que os limites recomendados pela Diretriz da União Européia, entretanto, alguns valores limites de qualidade são considerados menores que o máximo permitido. Isto reflete as prioridades políticas, econômicas e ambientais de cada país (HALL, 1998).

Tabela 3.6 - Comparação dos limites de qualidade dos lodos de esgotos estabelecidos pela USEPA 40 CFR Parte 503 e pela Diretriz da União Européia 86/278/EEC

Elementos Potencialmente Tóxicos	USEPA 40 CFR Parte 503		Diretriz da União Européia 86/278/EEC	
	Teor máximo	Teor recomendado	Teor máximo	Teor recomendado
Zinco	7.500	2.800	4.000	2.500
Cobre	4.300	1.500	1.750	1.000
Cromo	3.000	1.200	-	-
Chumbo	840	300	1.200	750
Níquel	420	420	400	300
Cádmio	85	39	40	20
Mercúrio	57	17	25	16

Valores expressos em mg.kg^{-1} (base seca)

FONTE: HALL (1998)

No Estado de São Paulo, a NORMA CETESB P 4.230 propõe os mesmos valores de níveis máximos dos elementos adotados pela legislação norte-americana. Já no Estado do Paraná, a SANEPAR adotou os valores recomendados pela Diretriz da União Européia.

3.7 REMOÇÃO DE METAIS NO LODO DE ESGOTO

A remoção de metais em lodo de esgoto pode ser alcançada ou pelo controle da fonte de descarga para o sistema de esgoto ou pela remoção de metais do lodo. No primeiro caso, a maior dificuldade é a identificação das fontes. Além disso, até com a completa eliminação de metais tóxicos de todas as descargas industriais para o esgoto, o problema permaneceria devido ao conteúdo de metais nos esgotos domésticos, principalmente de cobre e chumbo.

Desta forma, as alternativas para remoção de metais em lodo são os métodos químicos ou a biolixiviação (solubilização biológica).

3.7.1 Métodos químicos

Nos últimos 20 anos, muitos métodos químicos têm sido examinados para extração de metais do lodo, tais como: troca iônica, agentes quelantes e acidificação de lodo com diferentes ácidos (TYAGI *et al.*, 1993). O alto custo, problemas operacionais e resultados insatisfatórios da solubilização de metais são os principais problemas para a aplicação prática destes métodos. Para superar estes problemas na utilização de métodos químicos, a remoção de metais por solubilização biológica tem sido explorada (COUILLARD e MERCIER, 1994; TYAGI *et al.*, 1993; JAIN e TYAGI, 1992).

3.7.2. Biolixiviação

Segundo COUILLARD e CHARTIER (1991), a biolixiviação (solubilização biológica) em relação a solubilização química é mais econômica, exige menor quantidade de ácidos além de ter uma execução mais fácil.

Os principais tipos de bactérias usadas no processo biológico são: *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*. Estas bactérias são aeróbias e fixam o dióxido de carbono atmosférico.

Uma cultura da bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans* cresce em meio, cujo valores de pH se situa entre 1,0 e 4,0, sendo o pH ótimo 2,8, e utiliza enxofre elementar ou compostos reduzidos de enxofre como substrato oxidável.

A bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* é a única espécie do gênero capaz de catalisar a oxidação do íon ferroso, aumentando de 10^5 a 10^6 a velocidade de

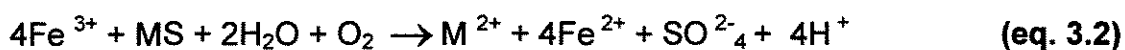
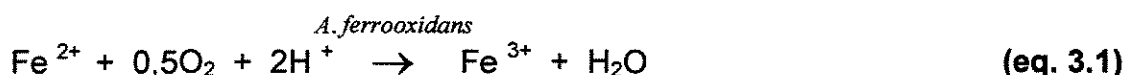
reação. A espécie também é acidofílica, pois seu pH ótimo de crescimento é em torno de 2,0, ocorrendo entretanto, crescimento numa faixa de pH entre 1,2 a 4,0. Basicamente, esta bactéria necessita de suprimentos de nitrogênio, fósforo e magnésio e um substrato inorgânico oxidável como fonte de energia, que pode ser o íon Fe^{2+} , enxofre elementar ou ainda um sulfeto metálico, como por exemplo a pirita, FeS_2 , principal substrato mineral utilizado pela bactéria.

A bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* é um dos principais microrganismos responsáveis pela lixiviação bacteriana de metais, ou biolixiviação, processo no qual o metabolismo microbiano causa a solubilização de metais de minérios.

Uma característica fisiológica marcante e altamente interessante da *Acidithiobacillus ferrooxidans* é a sua generalizada resistência a altas concentrações de íons metálicos, inclusive metais. Isto pode ser atribuído à presença constante de metais no próprio habitat da bactéria, fator que provavelmente determinou a seleção de tipos mais resistentes ao longo da evolução. Embora os mecanismos que determinam essa resistência não sejam muito conhecidos, sabe-se que *Acidithiobacillus ferrooxidans* apresenta resistência elevada ao alumínio, zinco, manganês, cobre, cromo, entre outros (NOVO, 1998).

O efeito de solubilização destas bactérias nos sulfetos metálicos pode ser explicado (COUILLARD e MERCIER, 1994) por meio dos seguintes processos:

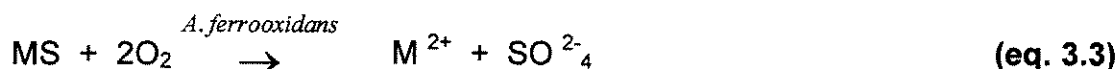
Processo indireto



Na equação (3.2), o íon férrico formado na equação (3.1), reage quimicamente com sulfeto metálico (MS). Esta ação solubiliza o metal por oxidação

do sulfeto para sulfato e forma ácido sulfúrico, com menor pH. Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} , e mais tarde pode ser reoxidado biologicamente pela *Acidithiobacillus ferrooxidans*, completando o ciclo.

Processo direto



Neste processo sulfetos metálicos não-ferrosos são diretamente oxidados pela bactéria para sulfato metálico solúvel. A bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans* não oxida ferro; é melhor conhecida por sua habilidade para crescer em compostos de enxofre elementar.

3.8. EFICIÊNCIA DA BIOLIXIVIAÇÃO DE METAIS NO LODO DE ESGOTO

No trabalho realizado por TYAGI *et al.* (1988), a biolixiviação de metais em lodo digerido anaerobiamente foi estudada em sistema batelada usando tanto a cultura misturada de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* como a cultura simples de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Com a finalidade de se conhecer a eficiência da biolixiviação, durante o processo foi utilizado um lodo sem adição de bactérias, servindo como controle.

Na Tabela 3.7, estão apresentados o teor de metais no lodo bruto (porção sólida), o teor de metais nas porções sólida e líquida no lodo controle sem bactérias, o teor de metais nas porções sólida e líquida no lodo com a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* e o teor de metais nas porções sólida e líquida no lodo com as bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*.

Tabela 3.7 – Teor de metais no lodo de esgoto depois de 12 dias de biolixiviação

Metal	Lodo bruto	Lodo controle (sem bactérias)		Lodo com <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>		Lodo com <i>A.ferrooxidans</i> + <i>A.thiooxidans</i>	
	Porção sólida (mg.kg ⁻¹)	Porção sólida (mg.kg ⁻¹)	Porção líquida (mg.L ⁻¹)	Porção sólida (mg.kg ⁻¹)	Porção líquida (mg.L ⁻¹)	Porção sólida (mg.kg ⁻¹)	Porção líquida (mg.L ⁻¹)
Zinco	640	128	13	64	17,3	19,2	18,8
Chumbo	520	440	1,5	276	5,2	234	6,2
Cobre	2300	1610	20,1	805	44,8	575	51,7
Cádmio	10	7,0	0,075	6,0	0,12	5,0	0,15

FONTE: TYAGI *et al.*, 1988.

Na Tabela 3.8 é apresentada a porcentagem máxima de remoção de metais no lodo após 12 dias de biolixiviação. Os resultados demonstraram que o teor foi maior no lodo com as duas bactérias do que no lodo controle e no lodo com apenas uma única bactéria. Desta forma, a remoção de metais no lodo com as duas bactérias foi da ordem de 97, 75, 55 e 50% para zinco, cobre, chumbo e cádmio, respectivamente, após 12 dias de biolixiviação. Pode-se dizer, ainda, que a remoção de metais no lodo com as duas bactérias foi de aproximadamente 10% mais alta em relação ao lodo com uma bactéria.

Tabela 3.8 – Porcentagem máxima de remoção do teor de metais após 12 dias de biolixiviação no lodo de Québec, Canadá

Lodo	% de remoção do teor de metais					
	Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Controle	30	30	-	15	-	80
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	65	40	-	47	-	90
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> + <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	75	50	-	55	-	97

FONTE: TYAGI *et al.* (1988)

TYAGI *et al.* (1988) constataram, ainda, que o processo de solubilização biológica pode ser feito em diferentes reatores. A solubilização de metais foi obtida em menor tempo no reator contínuo do que em batelada. Entretanto, este último possui a vantagem de ter um procedimento e um controle mais fácil do que o primeiro.

3.9 CULTURAS APTAS A RECEBEREM O LODO DE ESGOTO

A composição mineral (nitrogênio, fósforo e nutrientes) e orgânica do lodo fazem deste resíduo um condicionador do solo com propriedades semelhantes aos outros resíduos usados sem restrições na agricultura (esterco suíno, bovino, etc). Portanto, em termos de resposta agrônômica o lodo pode ser aplicado com bons resultados à maioria das culturas. Porém, certas espécies vegetais como as gramíneas, tiram melhor proveito do teor e liberam lentamente o nitrogênio do lodo, dando melhores respostas agrônômicas.

As leguminosas (soja, feijão etc), pelo fato de fixarem nitrogênio da atmosfera respondem com menor intensidade. Também existem culturas com menores necessidades de nitrogênio, como a do girassol. Neste caso, se utilizado, o lodo deve ser aplicado em doses menores.

Já nos produtos vegetais consumidos crus como verduras e legumes, por medida de segurança, é vetado o uso do lodo, mesmo higienizado.

As gramíneas principalmente as de grandes culturas (milho, trigo, cana-de-açúcar, sorgo, dentre outras) são as mais indicadas para a reciclagem agrícola do lodo, pois além de tirarem bom proveito do resíduo, seus controles fitossanitários e a colheita são realizados mecanicamente, sendo o produto final normalmente industrializado, o que reduz a quase zero o risco de qualquer tipo de contaminação.

Além das culturas tradicionais, outras formas de reciclagem agrícola do lodo incluem a fruticultura, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas.

3.9.1 Cultura de feijão

O feijão tem especial importância no Brasil, não só por ser um dos maiores países produtores e consumidores mundiais, mas também por ser este alimento uma das principais fontes protéicas do povo brasileiro. Seu consumo *per capita* está em torno de 16 kg/habitante/ano (CHIARADIA e GOMES, 1997).

O feijão é uma cultura de ciclo curto (mais ou menos 90 dias) e possui três principais épocas de plantio: águas ou safra (agosto a outubro), seca ou safrinha (janeiro a março) e inverno (maio a julho) .

O feijoeiro é uma planta muito sensível às deficiências hídricas que podem ocorrer durante o seu ciclo natural, quedas no teor de umidade do solo, mesmo por pequenos períodos, poderão reduzir bastante a produção. Para solucionar este problema, em diversos trabalhos de pesquisa realizados, pode-se concluir que em solos com maiores teores de matéria orgânica, seja natural ou incorporada artificialmente, a produção da cultura é aumentada, sobretudo em virtude da elevação e manutenção, por maior prazo de tempo, do teor de umidade do solo.

A matéria orgânica constitui um dos fatores mais importantes para a produção do feijoeiro. A sua função, além de ser fonte de nutrientes ao se decompor, é formar uma série de compostos orgânicos complexos que retêm os nutrientes por maior período, que vão sendo liberados à medida que estes compostos vão sendo hidrolisados e colocados à disposição da planta. A matéria orgânica é fonte de nitrogênio, fósforo, enxofre e outros elementos. A maioria dos solos com baixo teor de matéria orgânica apresenta uma série de doenças radiculares de difícil controle, em razão da baixa capacidade de retenção de nutrientes. Por meio da retenção de água e da cobertura da superfície do solo, a matéria orgânica controla a temperatura,

oferecendo aos microrganismos do solo condições de sobrevivência. Além disso, a matéria orgânica atua como agente cimentante dos solos desestruturados, o que favorece a sua granulação e a maior movimentação de água e gases.

Solos que receberam biofertilizantes e depois foram cultivados com feijoeiro indicaram maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, bem como elevação de pH. Em alguns casos, solos que receberam matéria orgânica, como por exemplo, esterco de aves, após dois a três anos consecutivos, produziram feijão dispensando a reposição de adubo mineral.

O lodo de esgoto usado como fertilizante para a produção de feijão é uma prática que está sendo recomendada devido ao seu alto teor de matéria orgânica, melhorando as condições físico-químicas do solo.

NOGUCHI e ITO (1992) a fim de comparar a produtividade de feijão assim como verificar os níveis de metais no produto final, fizeram plantios, usando tanto o lodo de esgoto (2 toneladas) com complementação de fertilizante químico como somente o fertilizante químico, em uma área de 1.000 m² cada. O rendimento de feijão plantado com lodo de esgoto foi em torno de 88% maior do que com o fertilizante químico.

Na Tabela 3.9 é apresentado o teor de metais em semente de feijão.

Tabela 3.9 – Teor de metais em semente de feijão (NOGUCHI e ITO, 1992)

Fertilizantes	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cádmio	Chumbo	Cromo	Cobre	Níquel	Zinco
Químico	n.d	n.d.	n.d.	15	2,0	33
Lodo	n.d	n.d.	n.d.	19	1,8	41

n.d. – abaixo do limite de detecção do aparelho

Comparando-se os resultados de metais no feijão (Tabela 3.9) com os teores máximos permitidos de metais em semente de feijão (Tabela 3.10), observa-se que o

teor de cobre ultrapassou o teor máximo permitido de metais em semente de feijão para os dois fertilizantes usados e que o teor zinco somente ultrapassou o teor máximo quando o fertilizante usado foi o lodo de esgoto.

Tabela 3.10 – Teor máximo permitido de metais em semente de feijão

Metal	Teor (mg.kg ⁻¹)					
	Cádmio	Cromo	Cobre	Níquel	Chumbo	Zinco
Feijão	<0,10	0,24	10,5	5,04	0,83	39

FONTE: KEEFER *et al.*, 1986

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este item foi dividido em três etapas: 1) Metodologia de campo; 2) Metodologia de laboratório e 3) Metodologia analítica. Estas etapas serão descritas a seguir.

4.1 METODOLOGIA DE CAMPO

4.1.1 Fonte de amostras de lodo

As amostras de lodo digerido utilizadas neste estudo foram provenientes da Estação de Tratamento de Esgotos da SABESP, localizada em Barueri (SP), que emprega como processo de tratamento a digestão anaeróbia do lodo, seguido da adição de Ca(OH)_2 e FeCl_3 para, respectivamente, reduzir a atividade biológica e facilitar a eliminação de água do mesmo, que é feita através de filtro prensa. Na Figura 4.1 é apresentado o fluxograma dos processos realizados na ETE Barueri.

4.1.2 Estratégia amostral de lodo

Todas as amostras de lodo digerido usadas neste estudo, foram coletadas diretamente das torneiras existentes nos digestores anaeróbios da estação de tratamento (Figura 4.1 - ponto de coleta 13). As mesmas foram guardadas em recipiente de plástico, conservadas no gelo e armazenadas sob refrigeração a 4°C antes de sua utilização.

Para a primeira etapa do trabalho, coletaram-se aproximadamente 3 litros de lodo digerido em cada amostragem feita nos meses de fevereiro, março, abril, junho e novembro de 1999. Nestas amostras foi realizada a quantificação do teor de metais, a fim de se colocar em rotina laboratorial a prática de digestão ácida adotada, a qual será detalhada posteriormente.

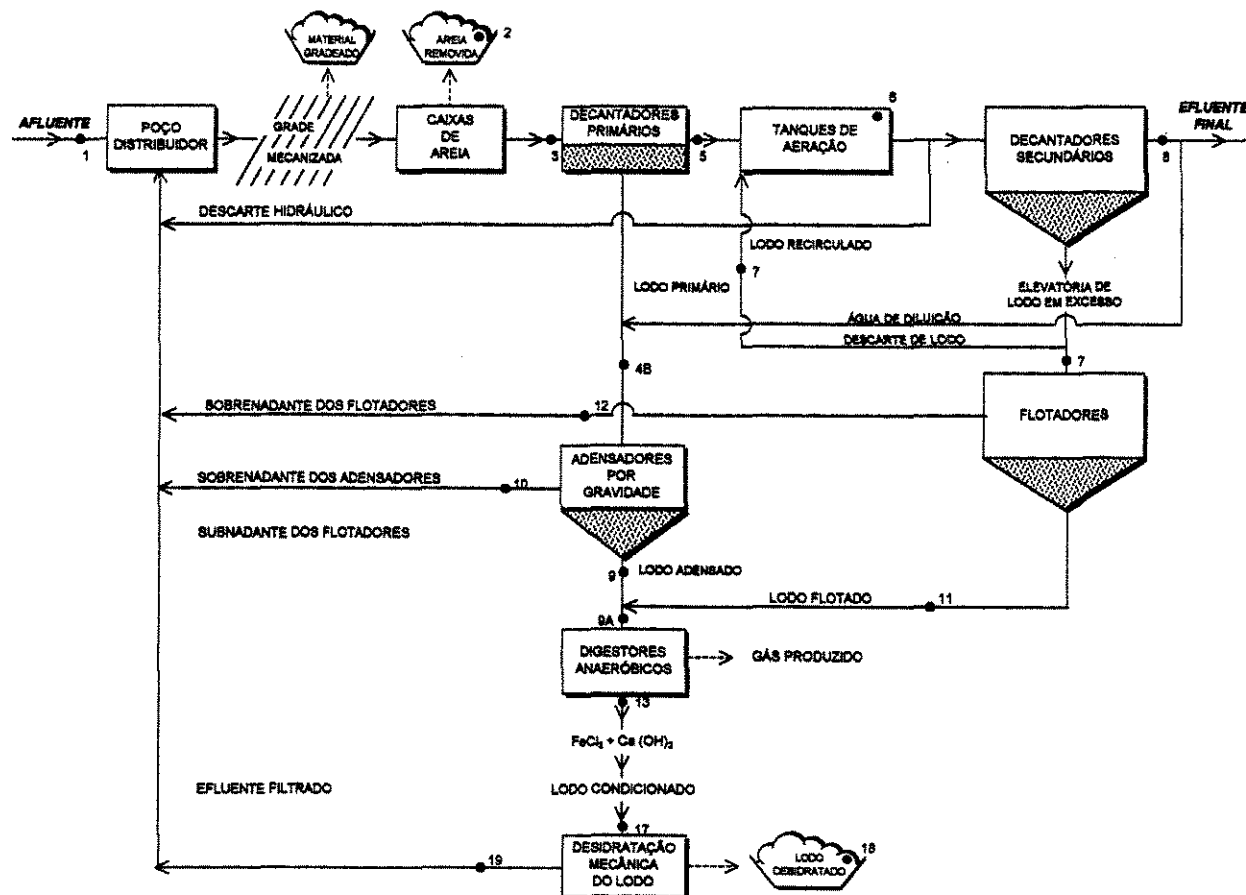


Figura 4.1 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri (SP)

Na segunda etapa do trabalho, foi coletado lodo nos meses de janeiro e de agosto de 2001 e no mês de janeiro de 2002. Em cada mês foram coletados aproximadamente 50 L de lodo digerido. Este volume foi processado da seguinte forma: 25 L de lodo foram apenas centrifugados e guardados em saco plástico, para uso direto na agricultura e, a outra metade, foi usada para fazer o experimento de biolixiviação de metais no lodo, sendo centrifugado após o término do processo e guardado para uso agrícola.

4.2 METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

4.2.1 Processamento da amostra de lodo para a análise de metais

Todo material utilizado para determinação de metais nas amostras de lodo foi deixado imerso no ácido nítrico p.a. (20%) por no mínimo 24 horas, logo enxaguado três vezes com água deionizada e, após, secado em estufa.

As amostras de lodo digerido foram centrifugadas a 10.000 rpm por 20 min a uma temperatura de 5 a 10°C (Centrífuga Sorvall® RC 26 PLUS rotor SLA 1500) para separar sólidos e líquidos. A porção líquida (sobrenadante) foi apenas acidificada com HNO₃ p.a., transferida para tubos plásticos e estocada a 4°C até o momento da análise, enquanto que a porção sólida sofreu um tratamento especial.

Desta forma, as amostras da porção sólida foram secas em estufa a temperatura de 80°C por 24 horas. Depois que esfriaram até temperatura ambiente, foram homogeneizadas com o auxílio de um moinho almofariz/pistilo (Marca Marconi, modelo MA 890), acondicionadas em recipiente de vidro com tampa de plástico, etiquetadas e guardadas hermeticamente fechadas, para posterior análise.

Para analisar metais, é necessário que esses elementos estejam em solução aquosa, mesmo que a amostra original seja sólida. Após ter realizado vários testes de digestão ácida, adotou-se o método adaptado de WINDOM *et al.*, 1989. Desta forma, a porção sólida do lodo foi digerida com ácidos fortes (HNO₃ p.a., HF p.a. e HClO₄ p.a.), numa temperatura em torno de 100°C. Primeiramente, uma subamostra de aproximadamente 0,25 gramas de lodo seco foi colocada num béquer de Teflon®; logo em seguida, foram adicionados 10 mL de HNO₃ (65%) p.a. e 10 mL de HF (48%) p.a., e deixado na capela, reagindo, por uma noite.

No dia seguinte, adicionou-se gota a gota 3 mL de HClO_4 (70%) p.a. e colocou-se o béquer sobre a chapa de aquecimento numa temperatura máxima de 120°C provocando a evaporação do ácido, até quase a secura. Depois, foi adicionado 1 mL de HNO_3 (65%) p.a. na amostra, esperando que chegasse até quase a secura novamente. Este procedimento foi repetido mais uma vez.

o terminar todo o processo de digestão, deixou-se esfriar a solução e adicionou-se 2 mL de HNO_3 10% e cerca de 10 mL de água deionizada no béquer. Logo, a solução foi filtrada com lã de vidro e transferida para um balão volumétrico aferido a 25 mL. Este balão foi bem agitado e sua solução foi transferida para um frasco de estocagem até o momento da análise. É importante ressaltar que esta solução pode ficar armazenada por um período máximo de 6 meses.

4.2.2 Crescimento dos microrganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*

Os microrganismos utilizados para a realização do processo de biolixiviação de metais no lodo foram *Acidithiobacillus ferrooxidans* (linhagem LR) e *Acidithiobacillus thiooxidans* (linhagem FG01), os quais foram cedidos pelo Laboratório de Biometalurgia, do Instituto de Química, da Universidade Estadual Paulista, em Araraquara (SP). O crescimento dos microrganismos foi realizado três vezes a fim de atender cada experimento de biolixiviação. Para produzir o volume necessário de cada uma das suspensões de bactérias, inicialmente, fez-se uma pré-fermentação utilizando 10 mL do inóculo e 100 mL do meio de cultura para cada uma das bactérias. Após, fez-se o crescimento de cada microrganismo utilizando 2 erlenmeyers de 1.000 L, adicionando em cada um 600 mL do meio de cultura e 30 mL do inóculo. Todos os erlenmeyers foram incubados num shaker modelo innova 4430 a 30°C e a 200 rpm.

4.2.2.1 Crescimento do microrganismo *Acidithiobacillus ferrooxidans*

O meio de cultivo utilizado para o crescimento da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi o meio líquido “T&K” (TUOVINEN e KELLY, 1973) preparado da seguinte forma: solução A – $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (0,5 g); K_2HPO_4 (0,5 g); $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,5 g); esses sais foram dissolvidos em água destilada (800 mL) com pH ajustado para 1,8 com H_2SO_4 ; solução B – $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (33,3 g), dissolvido em 200 mL de água destilada com pH 1,8 (H_2SO_4). A solução A foi esterilizada em autoclave (20 min à 120°C) e a solução B por filtração em membrana ($0,45 \mu\text{m}$ de diâmetro de poro). No momento do uso, misturou-se a solução A e B na proporção de 4:1, respectivamente.

O crescimento da *Acidithiobacillus ferrooxidans* pode ser visualizado facilmente por uma mudança na cor no meio utilizado: inicialmente a cor se apresenta levemente esverdeada, passando a um vermelho intenso sem precipitação. Tais mudanças são indicativas da oxidação completa do íon Fe^{2+} para Fe^{3+} , a qual pode ser acompanhada quantitativamente por titulação redox do Fe^{2+} com dicromato de potássio.

Determinação de Fe^{2+} por titulação com Dicromato de Potássio

Para determinar Fe^{2+} , transferiu-se para um erlenmeyer de 250 mL, uma alíquota de 1 mL das amostras coletadas periodicamente. A seguir, adicionou-se 2 mL de uma mistura concentrada (1:1) de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$ e elevou-se o volume para 50 mL com água deslilada, adicionando-se a seguir, 8 gotas do indicador difenilaminsulfonato de sódio (0,3% em água). Logo, iniciou-se a titulação com dicromato de potássio (padrão primário), sob agitação lenta e constante até a solução adquirir uma tonalidade verde-azulada, próximo ao ponto final. Continuou-se a titulação com dicromato de potássio gota a gota, até a formação de uma coloração azul-violácea indicando o ponto final da titulação (GARCIA *et al.*, 1995).

$$\mathbf{M.V \times 111,68 = massa \text{ Fe}^{2+} \text{ (g)}.V'} \quad \mathbf{(eq. 4.1)}$$

onde:

M = molaridade do dicromato (g.L^{-1});

V = volume de dicromato usado para titular (mL);

V' = volume da alíquota (mL).

4.2.2.2 Crescimento do microrganismo *Acidithiobacillus thiooxidans*

Para o crescimento da bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans* foi utilizado o meio de cultura "9K" estritamente mineral (SILVERMAN e LUDGREN, 1959), contendo enxofre elementar como fonte energética. Este meio foi preparado do seguinte modo: solução A - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (3,0 g); KH_2PO_4 (0,5 g); $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0,5 g); $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (0,01 g); KCl (0,1 g); esses sais foram dissolvidos em água destilada (1.000 mL) com pH ajustado para 2,8 com H_2SO_4 ; Fonte Energética – Enxofre elementar (10 g), esta quantidade foi separada em papel alumínio contendo 1 g de enxofre cada. A solução A foi esterilizada por 20 minutos à 120°C em autoclave e a fonte energética também foi esterilizada em autoclave, por 1 hora à 110°C, para evitar a fusão do enxofre. No momento do uso foi adicionou-se 1g de enxofre esterilizado para cada 100 mL da solução A.

4.2.3 Experimento para remoção de metais no lodo de esgoto

Os experimentos para remoção de metais no lodo foram realizados por meio da biolixiviação, a qual usa bactérias capazes de transferir parte dos metais da porção sólida para porção líquida do lodo. Estes experimentos foram realizados em janeiro e agosto de 2001 e em janeiro de 2002, todos conduzidos em reatores do tipo batelada (Figura 4.2), totalizando um volume de lodo digerido em cada experimento de aproximadamente 24 L. O volume adicionado de cada uma das suspensões de bactérias (*Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*) foi de 1.200 mL, correspondendo a 5% em relação ao volume do lodo. O pH inicial do lodo foi ajustado para 4 com adição de H_2SO_4 . Os reatores foram colocados em uma mesa

agitadora dentro de uma estufa a uma temperatura de $24 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e com agitação de 125 rpm. Foi realizada a fermentação de uma amostra de lodo (500 mL) sem as bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans* juntamente com os experimentos de biolixiviação, servindo este lodo como controle. O pH foi medido a cada 24 horas durante cada um dos experimentos.

O tempo para realização de cada um dos três experimentos de biolixiviação foi no máximo de 12 dias. Na primeira biolixiviação, retiraram-se amostras de 100 mL de lodo contendo as duas bactérias no sexto, oitavo, décimo e décimo segundo dia. No segundo e no terceiro experimento foram retiradas amostras de 100 mL do sexto ao último dia de processo de cada experimento. Em cada uma das amostras foi analisado o teor de metais, a fim de avaliar a eficiência de solubilização de metais ao longo do processo.

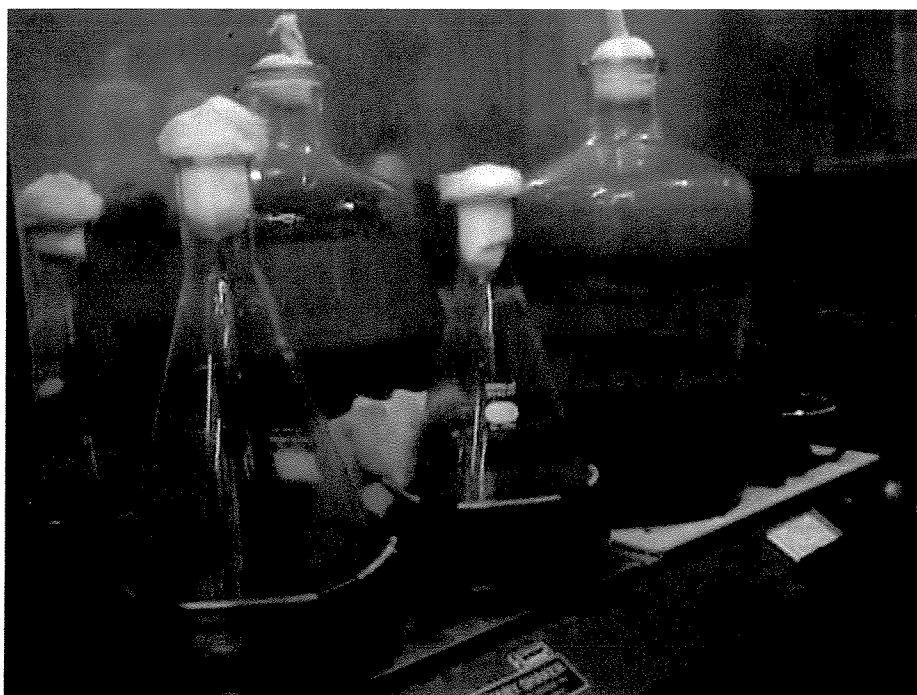


Figura 4.2 - Reatores do tipo batelada utilizados no processo de biolixiviação de metais no lodo de esgoto

4.2.4 Plantio de feijão

A planta teste utilizada para avaliar o teor de metais usando o lodo de esgoto como fertilizante foi a do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Carioca 80 SH, que possui coloração bege com estrias havanas.

As sementes de feijão foram cedidas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) - SP, garantindo assim a qualidade das mesmas.

O plantio foi realizado em solo do tipo Latossolo vermelho, utilizando três reatores de polietileno (volume de 500 L e área de aproximadamente 1 m²): 1) com aplicação de lodo tratado (com as duas suspensões de bactérias) centrifugado; 2) com aplicação de lodo bruto (sem bactérias) centrifugado e 3) com aplicação de adubo mineral, servindo como controle.

Cada reator foi composto da seguinte forma: tela plástica, 4 cm de brita nº 1 lavada, tela plástica novamente, 2 cm de areia grossa e solo. O corte esquemático do reator é apresentado na Figura 4.3.

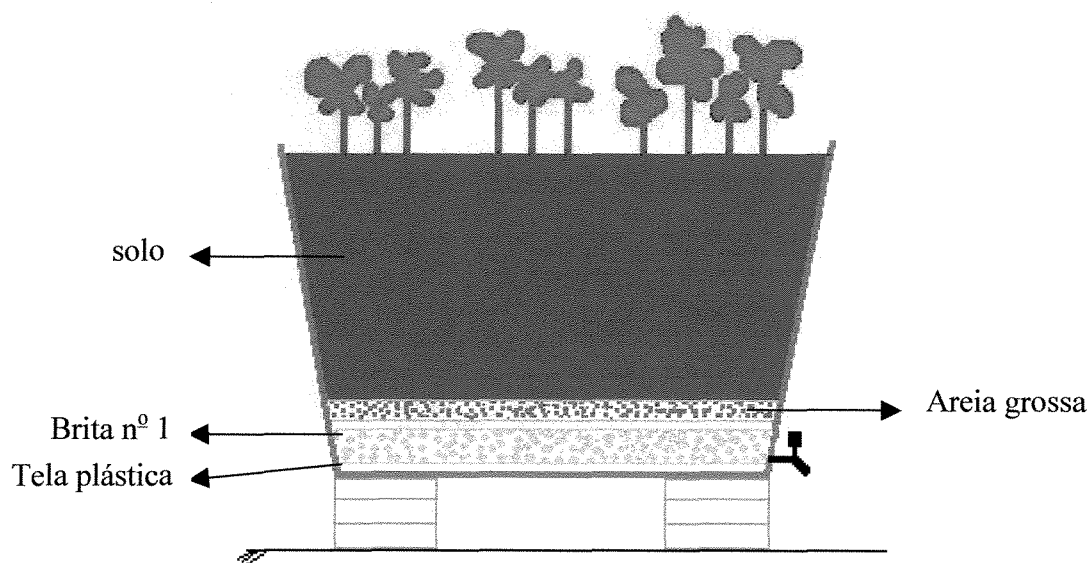


Figura 4.3 – Corte esquemático do reator

Os plantios foram realizados em três etapas: 1) início de fevereiro de 2001 (época das secas); 2) início de agosto de 2001 (época das águas); e 3) início de março de 2002 (época das secas).

Os adubos minerais utilizados como fonte de N, P_2O_5 e K_2O foram uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Na Tabela 4.1, apresentam-se as quantidades de lodo bruto, de lodo tratado biologicamente e de adubo mineral utilizadas em cada experimento.

Tabela 4.1 – Quantidade de lodo e de adubo mineral utilizados nos reatores

	Fertilizante	Reator 1	Reator 2	Reator 3
Experimento 1 (março/2001)	lodo bruto centrifugado	-	2 kg	-
	lodo tratado centrifugado	-	-	2 kg
	N (uréia)	3,53 g	-	-
	P_2O_5	4,41 g	3,14g	3,14 g
	K_2O	2,65 g	2,08 g	2,08 g
Experimento 2 (agosto/2001)	lodo bruto centrifugado	-	2 kg	-
	lodo tratado centrifugado	-	-	2 kg
	N (uréia)	3,53 g	-	-
	P_2O_5	4,41 g	3,14 g	3,14 g
	K_2O	2,65 g	2,08 g	2,08 g
Experimento 3 (março/2002)	lodo bruto centrifugado	-	-	-
	lodo tratado centrifugado	-	-	-
	N (uréia)	3,53 g	-	-
	P_2O_5	7,00 g	-	-
	K_2O	2,65 g	-	-

Os adubos minerais, o lodo bruto e o lodo tratado biologicamente foram distribuídos na superfície e incorporados ao solo até a profundidade de 10 cm. Depois foram feitas quatro covas em cada reator, colocando-se 3 sementes de feijão

em cada uma delas. A irrigação foi feita a cada 2 dias através de um sistema montado com aspersores. O líquido percolado foi coletado pela torneira existente na parte inferior de cada reator (Figura 4.3), para posterior análise de metais.

4.2.4.1 Processamento da amostra de feijão

A metodologia adotada para o processamento da amostra de feijão foi segundo ANGELUCCI (1981). Desta forma, diversas partes da planta de feijão foram colhidas, lavadas com água corrente para eliminar poeira e lodo e, em seguida, lavadas com água destilada. As amostras lavadas foram colocadas num filtro de papel para retirar o excesso de umidade. Em seguida, uma certa quantidade de amostra ($\cong 50$ g) foi seca em estufa à 80°C por 36 horas. O método que foi empregado para a análise dos metais na matéria seca foi o da digestão ácida. Trata-se de um processo simples e rápido, de destruição da matéria orgânica, sem volatilização dos contaminantes.

Para fazer a digestão ácida, foi pesado aproximadamente 0,5 g de amostra seca, e acrescentados 5 mL de mistura ácida (3 mL de HNO₃ 65% p.a. e 2 mL de HClO₄ 70% p.a.) num tubo de ensaio. A seguir, foram adicionadas 2 gotas de querosene e o tubo de ensaio foi, então, colocado num bloco digestor (temperatura máxima de 220°C), aquecido de maneira que o ácido nítrico fosse volatilizado em, no máximo, 40 minutos. Após o ácido perclórico ter reagido, aparecendo fumaça branca, os tubos foram retirados, esfriados, completados até 10 mL com água destilada, filtrados e guardados para posterior análise.

4.2.5 Análise química do solo

A caracterização química do solo foi efetuada pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC), seguindo a norma CETESB.

Para a realização das análises químicas foram coletadas amostras compostas de solo, de aproximadamente 200 g, numa profundidade de 20 cm em cada um dos reatores (1, 2 e 3) e acondicionadas em sacos plásticos limpos.

4.3 METODOLOGIA ANALÍTICA

4.3.1 Confiabilidade dos resultados

Para uma maior confiabilidade dos resultados, as digestões foram feitas em triplicatas, dosando para cada digestão uma amostra de branco e, ainda, um padrão de referência internacional (MESS-1). Para este padrão foi feita uma carta de controle de qualidade analítica para cada elemento analisado, conforme mostra o exemplo da Figura 4.4.

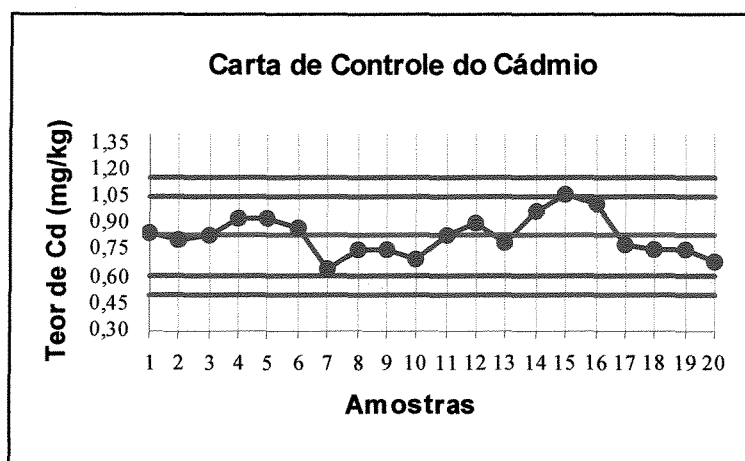


Figura 4.4 - Controle de qualidade analítica para cádmio (FRANÇA, 1998)

A carta de controle foi feita usando um número expressivo de amostras, onde foi calculada a média (M) e o desvio padrão da média (σ_x). A partir destes dois resultados, o gráfico com o intervalo de confiança foi construído, tendo-se: uma linha azul representando a média; duas linhas verdes representando $M \pm 2\sigma_x$ e duas linhas vermelhas representando $M \pm 3\sigma_x$. As amostras que ficaram dentro do intervalo de

confiança (linhas vermelhas) foram consideradas confiáveis, e as que ficarem fora do intervalo foram consideradas anômalas, portanto descartadas.

4.3.2 Análise de metais por Espectrometria de Absorção Atômica por Chama

O teor de metais (cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel e zinco) tanto no lodo de esgoto digerido (porções líquida e sólida) como nas diversas partes da planta de feijão foi determinado num espectrofotômetro de absorção atômica (marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 300), modalidade chama, localizado no Laboratório de Saneamento e Ambiente, da Faculdade de Engenharia Civil (UNICAMP).

4.3.2.1 Preparo das soluções padrões

A solução padrão para cada elemento foi preparada a partir de uma solução estoque de $1.000 \mu\text{g}.\text{mL}^{-1}$, sendo feita com a ampola Titrisol® da Merck e transferida para um balão volumétrico de 1.000 mL, aferido com água do sistema Milli-Q. A solução foi guardada em frasco plástico.

4.3.2.2 Procedimento de Calibração

Os procedimentos de calibração são vitais para atingir a exatidão em qualquer determinação analítica que usa técnicas instrumentais. O procedimento usual para obter a curva analítica é o seguinte: o analista deve confeccionar uma série de padrões (no mínimo cinco), na qual a concentração do elemento a ser determinada é conhecida. Estes padrões de calibração são medidos no instrumento analítico (neste trabalho, no EAA) sob as mesmas condições que aquelas usadas para o teste das amostras desconhecidas. Uma vez estabelecida a curva de calibração, a concentração de qualquer amostra pode ser obtida por interpolação.

É essencial que os padrões de calibração cubram totalmente o intervalo de concentrações requerido para a análise, para isto as concentrações das amostras testadas são determinadas normalmente por interpolação e não por extrapolação. Por outro lado, é crucialmente importante conhecer o valor do branco, solução que contém todos os reagentes exceto o elemento a ser determinado e que está sujeita ao mesmo procedimento analítico. Este procedimento geral conduz a várias questões. Uma delas é saber quão linear é a curva de calibração obtida. Segundo MASSART *et al.* (1988), é óbvio que cada ponto da curva de calibração está sujeito a erros. Então, qual é a melhor linha que passa através desses pontos? Para resolver estas questões, o método dos mínimos quadrados é usado. Estimando o coeficiente de correlação, pode-se obter informação em torno da relação entre o sinal analítico (absorbância) e a concentração, em outras palavras, quão bem os pontos experimentais se ajustam nesta linha. Usando este procedimento, calcula-se a melhor linha que passa entre os pontos na curva de calibração, cada qual está sujeito a um erro experimental.

Na Tabela 4.2, são apresentadas as condições operacionais do aparelho de absorção atômica utilizadas para determinação do teor de metais neste estudo. A chama utilizada para todos os metais foi ar-acetileno.

Tabela 4.2 - Condições operacionais do espectrofotômetro de absorção atômica

Metal	Comprimento de onda (nm)	Corrente da lâmpada (A)	Largura da Fenda (nm)	Padrões utilizados ($\mu\text{g.mL}^{-1}$)
Cobre	324,8	15	0,70	1; 2; 3; 4 e 5
Cádmio	228,8	4	0,70	0,1; 0,3; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 e 2,0
Cromo	357,9	25	0,70	1; 2; 3; 4 e 5
Níquel	231,1	25	0,20	0,2; 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0 e 3,0
Chumbo	283,3	10	0,70	4; 8; 12; 16 e 20
Zinco	213,9	15	0,70	0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1,0

4.3.2.3 Determinação do teor de metais na porção sólida do lodo e no feijão

A amostra digerida apresentou teor de metal igual a:

$$\text{Teor do metal, mg.kg}^{-1} \text{ (base seca)} = \frac{A \times B}{g \text{ da amostra}} \quad (\text{eq. 4.2})$$

onde:

A = teor do metal na solução digerida, mg.L⁻¹;

B = volume final de solução digerida, mL.

A solução resultante, concentrada, foi aferida a 25 mL para o lodo e a 10 mL para o feijão com água Milli-Q, para posterior análise.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 TEOR DE METAIS NO LODO DIGERIDO DA ETE BARUERI

Conforme visto no capítulo anterior, as amostras de lodo digerido foram coletadas durante os meses de fevereiro, março, abril, junho e novembro de 1999, com a finalidade de se conhecer o tratamento da amostra e, também, colocar em rotina laboratorial a prática da digestão ácida adotada. É bom lembrar que, dentre todas as operações analíticas, a etapa de pré-tratamento da amostra é a mais crítica. Em geral, é nesta etapa que se cometem mais erros e que se consome mais tempo. Por isso, os passos de um procedimento de pré-tratamento de amostra deverão ser sempre considerados cuidadosamente.

A seguir, são apresentados nas Tabelas 5.1 (dados fornecidos pela SABESP) e 5.2 (dados obtidos nesta pesquisa) os resultados do teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri dos meses citados acima.

Tabela 5.1 - Teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri

Mês/Ano	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Fev/98	11,80	177	452	254	208	1473
Mar/98	3,80	72	176	99	73	581
Abr/98	9,30	535	164	357	221	1745
Jun/98	9,80	451	651	298	232	1966
Nov/98	8,50	156	557	294	245	1794
Média 1998	8,9 ± 2,9	278 ± 202	400 ± 221	260 ± 97	195 ± 70	1511 ± 549

Tabela 5.2 - Teor de metais no lodo digerido da ETE Barueri

Mês/Ano	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Fev/99	10,10	310	1738	193	251	679
Mar/99	9,40	229,50	1474	162,5	206	550
Abr/99	10,10	290	1784	169	222	610
Jun/99	9,10	297	1790	164	290	562
Nov/99	9,70	115,40	531	630	228	1308
Média 1999	9,68 ± 0,48	248 ± 80	1463 ± 537	264 ± 205	239 ± 32	741 ± 320

Observa-se na Tabela 5.1, que o teor de vários metais, entre eles chumbo, cobre, cromo e zinco, foi bastante variado de um mês para o outro. Isto demonstra que o teor de metais no lodo varia de acordo com a descarga de efluentes industriais. Nota-se que no mês de março de 1998, o teor dos metais, com exceção do cobre, foi bem menor em relação aos outros meses do mesmo ano.

Analisando os resultados mostrados na Tabela 5.2, obtidos nesta pesquisa, percebe-se que o teor de chumbo e de cobre no mês de novembro em 1999 decresceu significativamente em relação aos outros meses do mesmo ano. Entretanto, o teor de cromo e de zinco teve um comportamento inverso no mês de novembro, aumentando de forma considerável. Esta variação do teor dos metais provavelmente esteja relacionada com as descargas industriais oficiais ou clandestinas na rede coletora de esgotos.

Através da Figura 5.1, pode-se visualizar melhor o comportamento dos metais nos anos de 1998 e 1999. Nota-se que os metais cádmio e níquel tiveram um pequeno aumento de concentração em 1999. Enquanto que o cobre aumentou em torno de 260% em relação ao ano de 1998. Esta variação acentuada provavelmente está associada ao aumento das atividades industriais que originam este metal, conforme Tabela 3.4.

Analisando, ainda, a Figura 5.1, percebe-se que tanto o chumbo como o zinco tiveram um teor médio menor no ano de 1999 em comparação ao ano de 1998. O zinco chegou a ter uma remoção de aproximadamente 51%, indicando que diminui o lançamento deste metal nos efluentes industriais em 1999.

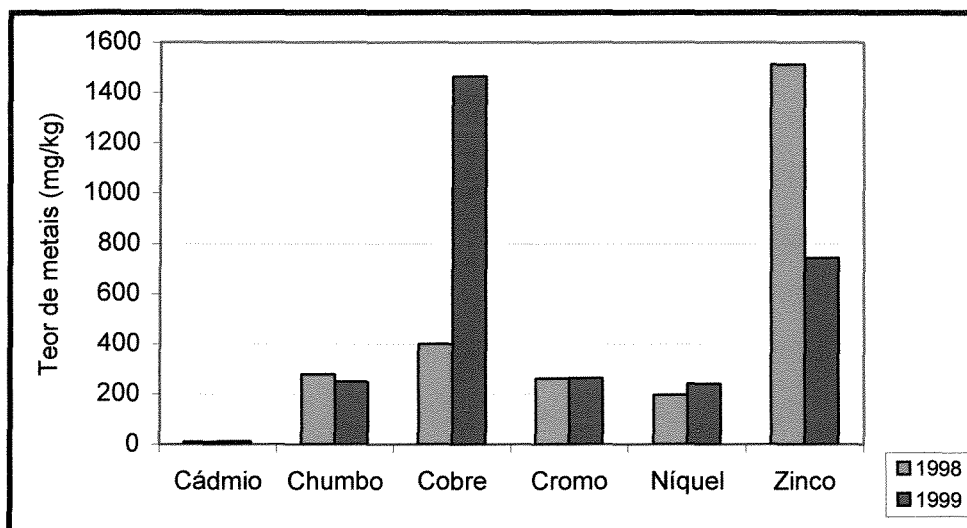


Figura 5.1 - Comparação do teor de metais na porção sólida do lodo nos anos de 1998 e 1999

Comparando-se o teor de metais encontrado no lodo de esgoto da ETE Barueri (Tabelas 5.1 e 5.2) com o teor máximo que é permitido em lodos para utilizá-lo na agricultura (Tabela 5.3), observa-se que o teor de metais encontrado no lodo de Barueri nos anos de 1998 e 1999 ultrapassou o nível recomendado para alguns países (Dinamarca, Finlândia, Suécia, etc) enquanto que para outros países (Estados Unidos, Luxemburgo) o uso desse lodo para agricultura poderia ser utilizado sem problema.

Tabela 5.3 – Teor máximo de metais no lodo de esgoto utilizado na agricultura em diversos países

País	Ano	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
		Cádmio	Cromo	Cobre	Níquel	Chumbo	Zinco
Comunidade Européia	1986	20 – 40	1.000 – 1.750	1.000 – 1.750	300 – 400	750 – 1.200	2.500 – 4.000
França	1988	20	1.000	1.000	200	800	3.000
Alemanha	1992	10	900	800	200	900	2.500
Itália	1992	20	----	1.000	300	750	2.500
Espanha	1990	20	1.000	1.000	300	750	2.500
Reino Unido	1989	3,5	600	225	125	300	500
Dinamarca	1995	0,8	100	1.000	30	120	4.000
Finlândia	1995	1,5	300	600	100	100	1.500
Suécia	1995	2,0	100	600	50	100	800
Estados Unidos	1993	39 – 85	1.200 – 3.000	1.500 – 4.300	20	300 – 840	2.800 – 7.500
Luxemburgo	1992	40	1.750	1.750	400	1.200	4.000
Países Baixos	1995	1,25	75	75	30	100	300
Canadá	1984	20	----	----	180	500	1.850

FONTE: McGRATH *et al.* (1994)

A Tabela 5.3 mostra que países como a Finlândia e a Alemanha tendem a restringir os valores máximos de metais permitidos nos lodos. Por outro lado, os Estados Unidos, possuem os maiores níveis permitidos para todos os elementos, com exceção do chumbo. Trabalhos indicam que os critérios adotados pelos Estados Unidos, que fixaram as normas através de 14 vias de contaminação (efeitos secundários), podem causar danos ecotoxicológicos a alguns microrganismos do solo importantes na fixação do nitrogênio. Os critérios podem, também, trazer sérios danos ambientais a longo prazo, devido ao acúmulo desses elementos tóxicos no ambiente (McGRATH *et al.*, 1994).

5.2 TEOR DE METAIS NO MATERIAL DE REFERÊNCIA INTERNACIONAL MESS-1

A fim de se verificar a qualidade do método aplicado, as análises do teor de metais no lodo (porção sólida) foram intercalibradas com o padrão de referência internacional MESS-1. Na Tabela 5.4, é apresentado o teor de metais no material de referência padrão e, também, o obtido neste estudo para o mesmo material. Na Figura 5.2, pode-se ver a carta controle de qualidade analítica para os metais analisados.

Tabela 5.4 – Teor de metais no material de referência internacional MESS-1

Material	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)			
	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
MESS-1 (padrão)	25,1 ± 3,8	71 ± 11	29,5 ± 2,7	191 ± 17
MESS-1 (neste estudo)	25,5 ± 3,2	68,8 ± 4,4	31,5 ± 3,1	175,4 ± 3,4

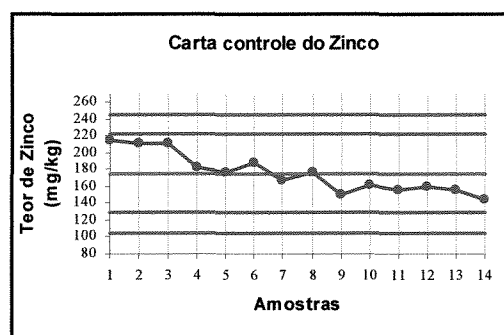
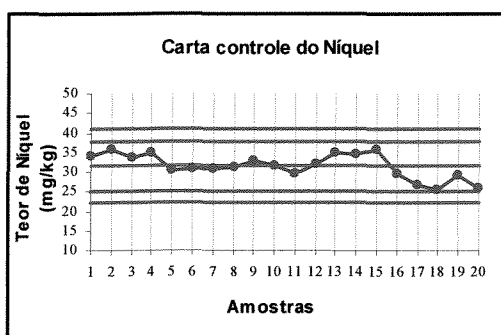
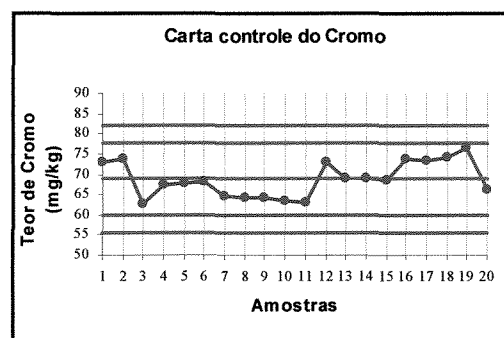
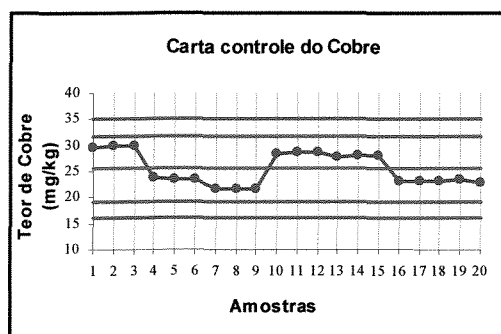


Figura 5.2 – Controle de qualidade analítica para cada metal analisado

Observando-se a Tabela 5.4, verifica-se que o teor de metal encontrado neste estudo para cobre, cromo, níquel e zinco apresentou concordância com o valor padrão para o material de referência MESS-1. De uma maneira geral, os resultados confirmaram a qualidade do método empregado.

5.3 CRESCIMENTO DOS MICRORGANISMOS *ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS* E *ACIDITHIOBACILLUS THIOOXIDANS*

O crescimento de ambos microrganismos foi feito utilizando as condições descritas no capítulo anterior: pH inicial de 1,8 e 2,8 para *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*, respectivamente; temperatura de 30°C; agitação de 200 rpm e controle de pH a cada 24 horas.

É bom ressaltar que o resultado do primeiro experimento para o crescimento dos microrganismos foi insatisfatório. Investigando-se a possível causa, descobriu-se que o erro estava na forma de preparo do meio de cultura. Por isso, deve-se ter o cuidado no momento da preparação de ambos os meios; o ajuste do pH da água destilada deve ser feito antes da adição dos sais pois, caso contrário, ocorre a precipitação do fosfato de potássio, inibindo o crescimento dos microrganismos.

O crescimento da bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* foi de aproximadamente 48 horas. Este crescimento pode ser visualizado facilmente por uma mudança na cor: inicialmente a cor se apresentou levemente esverdeada passando a um vermelho intenso sem precipitados, indicando a oxidação completa do íon Fe^{2+} para Fe^{3+} . Na Figura 5.3 pode ser visto o consumo de Fe^{2+} durante o crescimento da *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

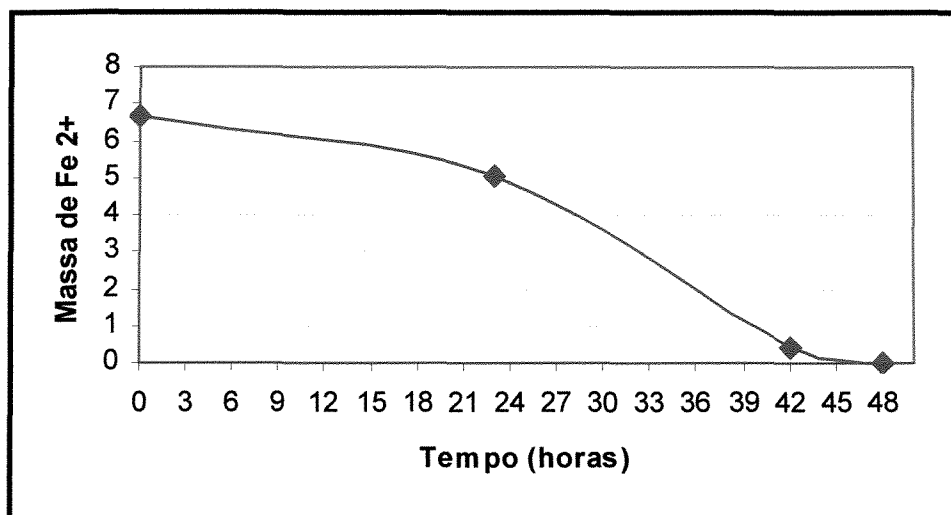


Figura 5.3 – Consumo de Fe²⁺ durante o crescimento da *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Para a bactéria *Acidithiobacillus thiooxidans*, o crescimento ocorreu em aproximadamente 9 dias, indicado pelo pH menor que 1,0.

Na Figura 5.4, pode ser visto o aspecto da cor das duas suspensões de bactérias ao término do crescimento.

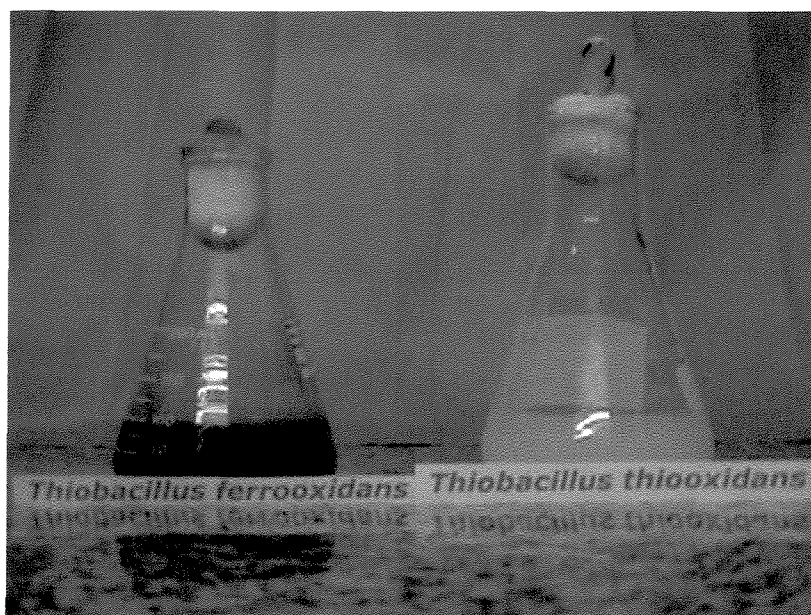


Figura 5.4 – Microrganismos *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*

5.4 EXPERIMENTO DE REMOÇÃO DE METAIS NO LODO DIGERIDO

De um modo geral, observou-se em todos os experimentos de biolixiviação mudanças nas características do lodo após os 12 dias de processo. Estas mudanças foram: a textura do lodo que no início do experimento era bem líquida tornou-se bem mais espessa e a coloração mudou de preta para marrom claro.

Conforme metodologia, após o processo de biolixiviação o lodo foi centrifugado, com a finalidade de separar as porções líquida e sólida. A seguir serão apresentados os resultados do teor de metais tanto na porção líquida como na porção sólida de cada um dos experimentos. Além disso, também será mostrada a variação do pH no lodo durante os três processos de biolixiviação.

5.4.1 Caracterização química do lodo tratado biologicamente e do lodo bruto

Na Tabela 5.5 é apresentada a caracterização química tanto do lodo tratado biologicamente (após 12 dias de biolixiviação) como do lodo bruto, ambos usados no terceiro experimento. Estas análises foram efetuadas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), seguindo a norma CETESB.

Tabela 5.5 – Caracterização química do lodo tratado biologicamente e do lodo bruto

Parâmetro	Unidade	Lodo tratado biologicamente	Lodo bruto
Fósforo	g.kg ⁻¹	17,5	14,4
Potássio	g.kg ⁻¹	1,5	2,0
Matéria Orgânica	g.kg ⁻¹	380,4	346,6
Nitrogênio Kjeldahl	g.kg ⁻¹	42,8	39,1
Cálcio	g.kg ⁻¹	3,6	21,2
Magnésio	g.kg ⁻¹	0,97	3,9

Continuação da Tabela 5.5

Cobre	mg.kg ⁻¹	134,3	590,3
Níquel	mg.kg ⁻¹	47,1	306,5
Zinco	mg.kg ⁻¹	328,7	2.434
Boro	mg.kg ⁻¹	1,7	9,2
Manganês	mg.kg ⁻¹	53,7	239,0
Ferro	mg.kg ⁻¹	34.723	30.090

Os valores de concentração são dados com base na matéria seca

Na Tabela 5.5, pode ser visto que o teor de fósforo, de nitrogênio e de matéria orgânica no lodo tratado biologicamente aumentou aproximadamente 22, 9 e 10%, respectivamente, em relação ao lodo bruto. Entretanto, o potássio e o cálcio tiveram um decréscimo de 25 e 83%, respectivamente, no lodo tratado.

É importante ressaltar que, a remoção do teor de cobre, níquel, zinco, boro e manganês no lodo tratado foi na faixa de 75 a 86% em comparação ao lodo bruto. O teor de ferro no lodo tratado, porém, aumentou em torno de 15%.

De um modo geral, a análise da composição do lodo indica seu potencial para uso agrícola, seja como condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, seja como substituto, em parte, dos adubos minerais atualmente em uso.

5.4.2 Variação do pH do lodo durante o processo de biolixiviação

Os resultados da variação do pH no lodo durante os três experimentos de biolixiviação são apresentados na Figura 5.5.

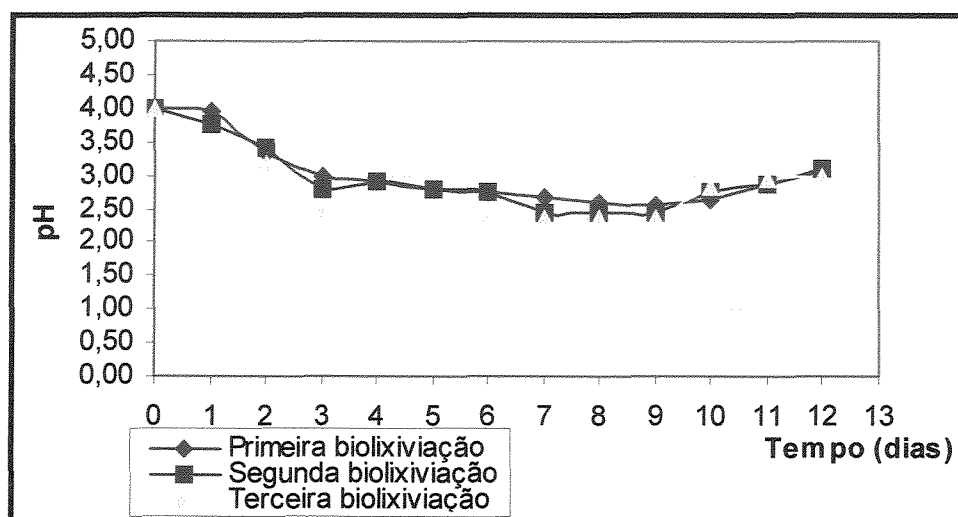


Figura 5.5 – Variação do pH do lodo digerido durante os experimentos de biolixiviação de metais

Analisando a Figura 5.5, observa-se que com o processo de biolixiviação, consegue-se uma remoção do pH no lodo, sem adição de ácido, de 4,0 para 2,3 e que esta remoção contribui para que ocorra a solubilização dos metais no meio líquido.

5.5 TEOR DE METAIS NO SOBRENADANTE DO LODO

Os resultados apresentados nas Tabelas 5.6, 5.7 e 5.8 correspondem a média do teor de metais no sobrenadante (porção líquida) do lodo bruto, do lodo bruto controle após 12 dias de fermentação e do lodo tratado biologicamente (amostras de sobrenadante em vários dias do processo) em cada um dos experimentos de biolixiviação realizados.

Tabela 5.6 – Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no primeiro experimento

Sobrenadante	Teor de metais (mg.L ⁻¹)				
	Cádmio	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	n.d.	2,20	n.d.	0,2	6,90
Lodo Bruto Controle (12 dias)	n.d.	8,80	0,04	1,0	12,00
Lodo Tratado (6 dias)	n.d.	16,00	0,81	1,8	47,20
Lodo Tratado (8 dias)	n.d.	17,50	1,86	1,6	37,00
Lodo Tratado (10 dias)	n.d.	17,00	1,39	1,6	59,00

n.d. – abaixo do limite de detecção do aparelho

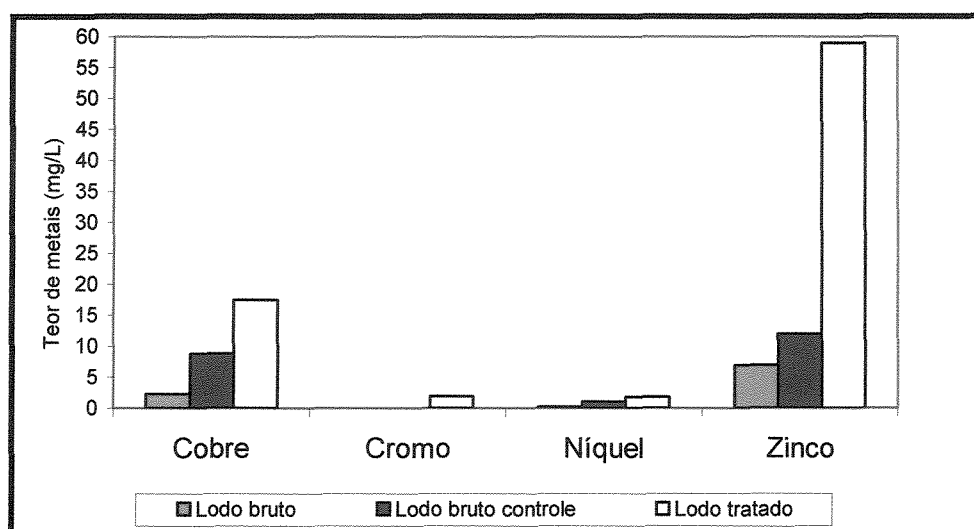
Tabela 5.7 – Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no segundo experimento

Sobrenadante	Teor de metais (mg.L ⁻¹)					
	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	0,86	22,70	1,18	0,75	8,97	19,00
Lodo Bruto Controle (12 dias)	1,29	24,60	10,00	0,85	9,32	26,90
Lodo Tratado (7 dias)	1,41	31,50	15,56	1,82	-	44,80
Lodo Tratado (8 dias)	-	44,10	16,27	1,36	12,14	58,10
Lodo Tratado (9 dias)	1,43	33,00	11,99	1,17	12,24	35,20
Lodo Tratado (10 dias)	1,43	34,30	11,89	0,70	10,21	30,40

Tabela 5.8 – Teor de metais no sobrenadante do lodo durante a biolixiviação no terceiro experimento

Sobrenadante	Teor de metais (mg.L ⁻¹)					
	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	0,43	19,42	n.d.	1,53	3,75	7,10
Lodo Bruto Controle (12 dias)	0,48	23,68	1,72	1,94	7,69	27,92
Lodo Tratado (6 dias)	1,26	41,10	11,20	1,73	8,29	36,99
Lodo Tratado (7 dias)	1,26	48,30	11,46	1,68	8,59	34,62
Lodo Tratado (8 dias)	1,35	43,20	13,55	2,43	9,86	50,75
Lodo Tratado (9 dias)	1,28	39,30	11,05	2,42	9,22	50,43
Lodo Tratado (10 dias)	1,28	36,00	10,95	2,27	9,10	49,16
Lodo Tratado (11 dias)	1,24	31,30	10,52	2,47	7,99	44,16
Lodo Tratado (12 dias)	1,27	29,60	10,41	2,31	8,74	47,36

A seguir, são apresentadas as Figuras 5.6, 5.7 e 5.8, comparando o teor de metais no sobrenadante do lodo bruto, do lodo bruto controle e do lodo tratado biologicamente (considerou-se o maior teor para cada metal).

**Figura 5.6 – Teor de metais no sobrenadante do lodo na primeira biolixiviação**

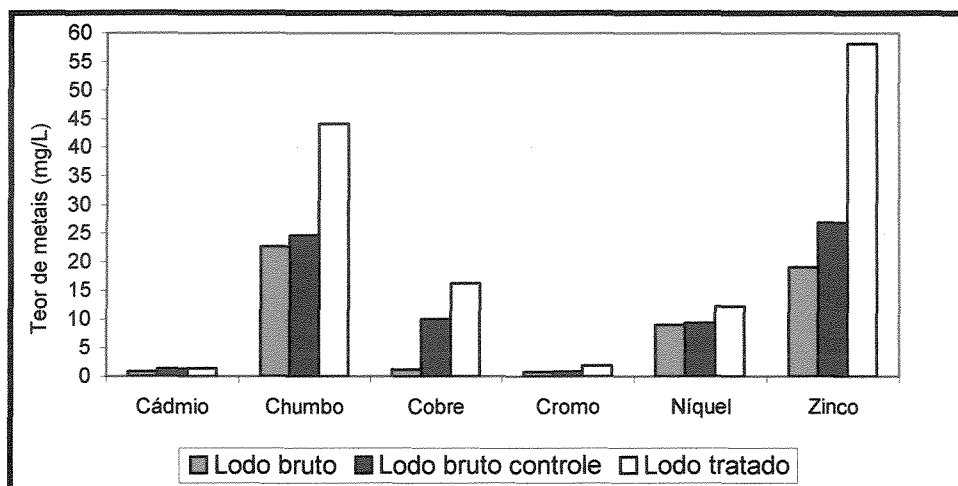


Figura 5.7 – Teor de metais no sobrenadante do lodo na segunda biolixiviação

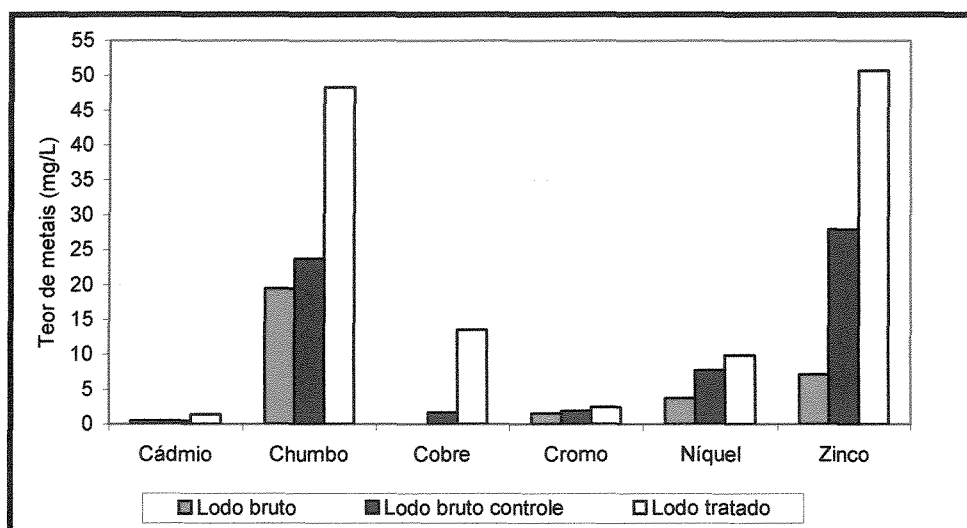


Figura 5.8 – Teor de metais no sobrenadante do lodo na terceira biolixiviação

Analisando os resultados obtidos para cada metal, observa-se que por meio do processo de biolixiviação consegue-se uma transferência de metais da porção sólida para a porção líquida no lodo tratado biologicamente. Verifica-se, também, que apesar do teor de metais ser menor no sobrenadante do lodo bruto controle quando comparado com o lodo tratado, ainda assim, os resultados demonstraram que apenas o processo de fermentação do lodo é capaz de aumentar o nível de teor de

metais na porção líquida. Isto reforça a importância de se fazer um tratamento do sobrenadante, principalmente resultante do processo de biolixiviação.

Neste trabalho, o sobrenadante do lodo tratado biologicamente teve seu pH ajustado para 10 com a adição de NaOH, provocando com isso uma alteração na cor, alterando de amarelo claro para laranja. Após um determinado tempo (aproximadamente 2 horas), verificou-se que os metais solubilizados tinham sido aparentemente precipitados. Estes metais podem ser reciclados para as indústrias de metais. Na Tabela 5.9, são apresentados os resultados das análises do teor de metais no sobrenadante após o ajuste do pH para 10 no lodo tratado (após 12 dias de biolixiviação).

Tabela 5.9 – Teor de metais no sobrenadante do lodo tratado biologicamente em pH = 10

Metais	Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Níquel	Zinco
Teor de metais (mg.L ⁻¹)	n.d.	2,76	3,38	0,80	n.d.	0,40

Comparando-se o teor de metais no sobrenadante do lodo tratado (após 12 dias de biolixiviação) do terceiro experimento (Tabela 5.8) com o teor de metais no sobrenadante do lodo (pH = 10) da Tabela 5.9, verifica-se que a percentagem de remoção de metais no sobrenadante em ordem decrescente foi a seguinte: 100% para cádmio e níquel, 99% para zinco, 91% para chumbo, 68% para cobre e 37% para cromo.

5.6 TEOR DE METAIS NA PORÇÃO SÓLIDA DO LODO

Neste item serão apresentados a média e o desvio padrão referentes ao teor de metais na porção sólida do lodo bruto, do lodo bruto controle e do lodo tratado biologicamente, nos três experimentos de biolixiviação de metais realizados.

Também com o intuito de fornecer subsídios a trabalhos subsequentes, nos anexos A, B e C estão apresentados, para cada amostra, a concentração obtida pelo uso da curva padrão (apresentada no anexo D), o volume, a massa e a concentração final para cada metal analisado.

5.6.1 Primeiro experimento de biolixiviação de metais no lodo

Na Tabela 5.10 e nas Figuras 5.9 e 5.10 podem ser vistos os resultados obtidos do teor de metais no primeiro experimento de biolixiviação.

Tabela 5.10 – Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no primeiro experimento

Porção sólida	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	539,87 ± 1,06	n.d.	558,34 ± 10,25	163,54 ± 4,02	476,58 ± 10,78	2.464,90 ± 31,81
Lodo Tratado (6 dias)	179,65 ± 5,26	n.d.	493,87 ± 7,02	98,07 ± 3,39	116,34 ± 4,06	597,48 ± 12,46
Lodo Tratado (8 dias)	157,78 ± 6,51	n.d.	372,67 ± 6,07	58,75 ± 2,77	75,85 ± 4,01	380,41 ± 17,60
Lodo Tratado (12 dias)	320,26 ± 12,53	n.d.	439,35 ± 5,36	122,86 ± 4,91	168,62 ± 5,33	639,15 ± 14,67
Lodo Bruto (12 dias)	350,70 ± 5,50	n.d.	458,08 ± 6,97	101,79 ± 2,33	266,84 ± 6,71	714,25 ± 13,86

n.d. – abaixo do limite de detecção do aparelho

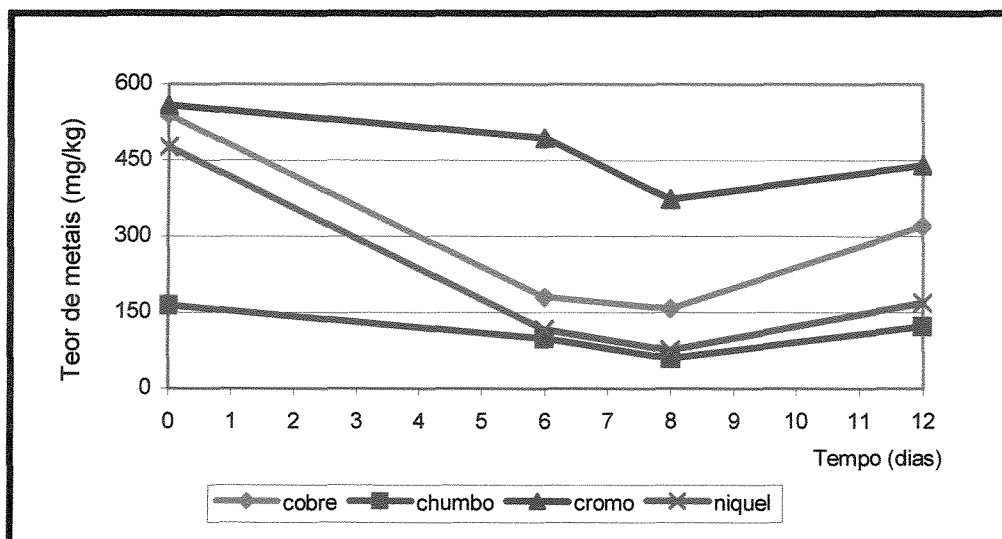


Figura 5.9 – Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no primeiro experimento

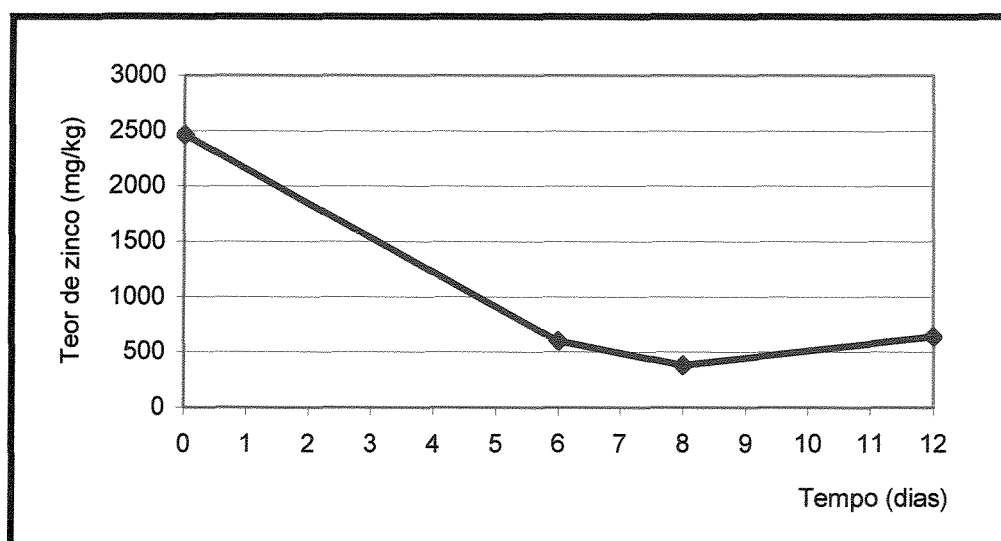


Figura 5.10 – Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no primeiro experimento

Analisando as Figuras 5.9 e 5.10, observa-se que o teor para todos os metais decresce até o oitavo dia, subindo novamente até o final do experimento, talvez pelo aumento do pH no meio. Desta forma, com o resultado deste primeiro experimento de biolixiviação sentiu-se a necessidade de se conhecer melhor o comportamento dos metais no intervalo do oitavo ao décimo primeiro dia de processo.

5.6.2 Segundo experimento de biolixiviação de metais no lodo

Na Tabela 5.11 e nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 podem ser vistos os resultados obtidos do teor de metais no segundo experimento de biolixiviação.

Tabela 5.11 – Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no segundo experimento

Porção sólida	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	545,43 ± 6,21	4,11 ± 0,20	453,68 ± 2,20	318,66 ± 4,01	407,89 ± 1,78	1551,49 ± 95,57
Lodo Tratado (6 dias)	336,87 ± 6,34	1,66 ± 0,14	402,07 ± 3,45	152,47 ± 8,93	96,13 ± 4,29	346,88 ± 18,39
Lodo Tratado (7 dias)	260,97 ± 4,48	1,34 ± 0,12	334,47 ± 7,02	139,97 ± 3,07	95,48 ± 1,72	313,59 ± 14,75
Lodo Tratado (8 dias)	207,11 ± 3,43	1,11 ± 0,14	229,39 ± 3,75	119,80 ± 7,51	85,79 ± 1,39	284,83 ± 12,22
Lodo Tratado (9 dias)	218,57 ± 3,58	1,57 ± 0,14	233,17 ± 3,93	133,83 ± 5,98	88,44 ± 2,36	263,85 ± 14,76
Lodo Tratado (10 dias)	252,77 ± 8,07	2,31 ± 0,23	313,26 ± 3,02	144,74 ± 4,32	98,50 ± 4,41	276,43 ± 22,91
Lodo Tratado (11 dias)	242,17 ± 5,41	2,78 ± 0,15	317,26 ± 3,45	136,43 ± 3,94	88,32 ± 2,83	293,29 ± 12,95
Lodo Bruto (12 dias)	366,33 ± 5,80	3,59 ± 0,18	357,46 ± 11,58	169,60 ± 3,97	247,86 ± 1,84	494,40 ± 26,48

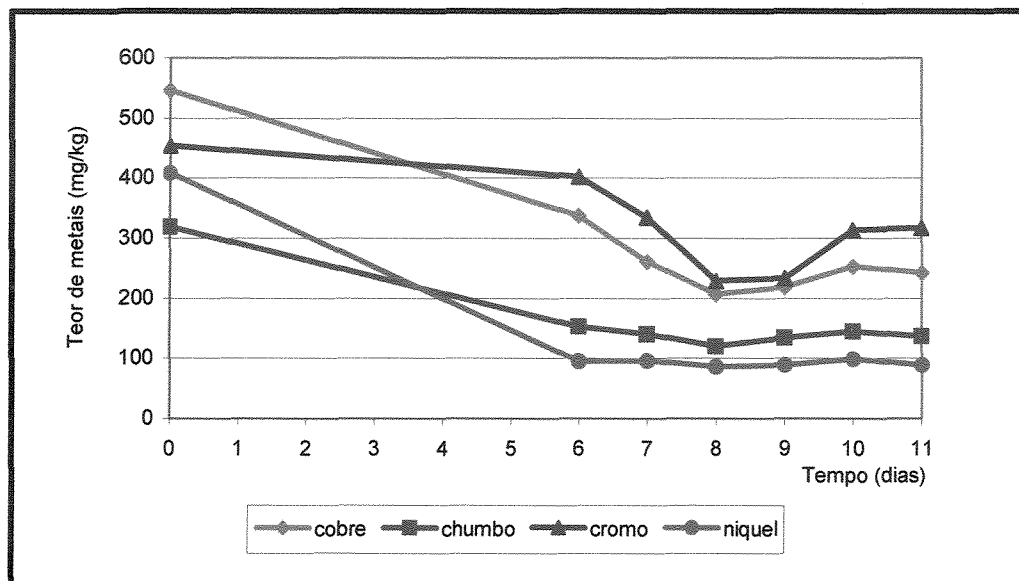


Figura 5.11 – Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento

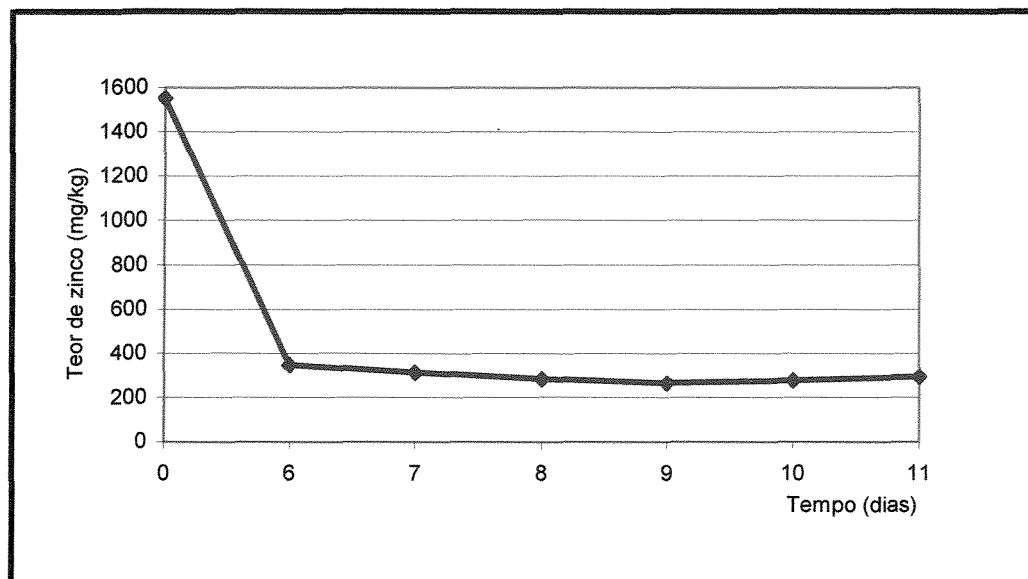


Figura 5.12 – Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento

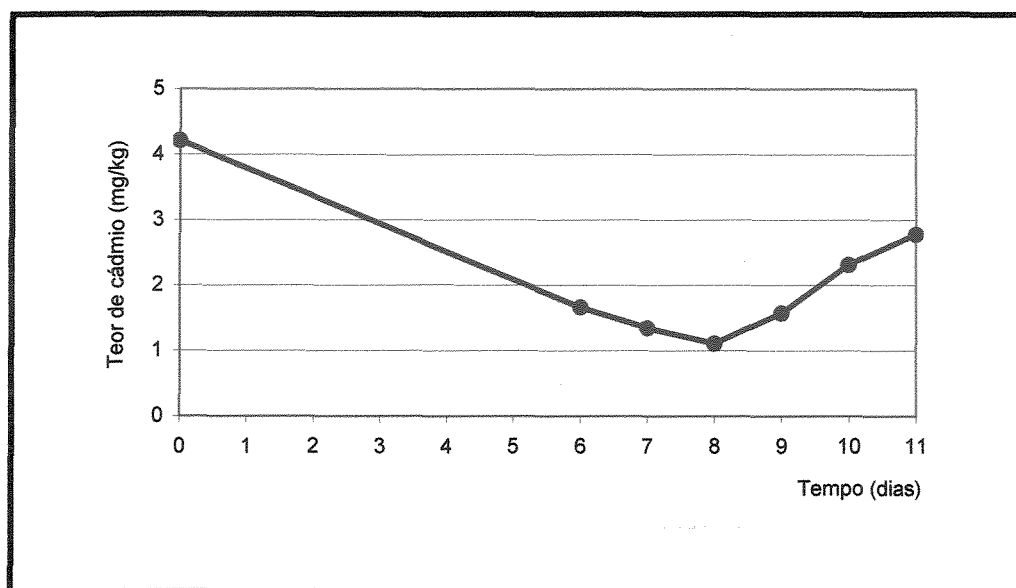


Figura 5.13 – Teor de cádmio na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no segundo experimento

5.6.3 Terceiro experimento de biolixiviação de metais no lodo

Na Tabela 5.12 e nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16 podem ser vistos os resultados obtidos do teor de metais no terceiro experimento de biolixiviação.

Tabela 5.12 – Teor de metais na porção sólida do lodo durante a biolixiviação no terceiro experimento

Porção sólida	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)					
	Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Lodo Bruto	593,90 ± 6,14	14,43 ± 0,37	631,02 ± 3,08	330,05 ± 3,20	338,26 ± 3,19	2.437,09 ± 43,72
Lodo Tratado (6 dias)	174,70 ± 3,53	5,42 ± 0,30	469,82 ± 4,84	182,25 ± 4,37	81,30 ± 2,23	326,93 ± 15,54
Lodo Tratado (7 dias)	172,57 ± 4,91	4,83 ± 0,14	447,56 ± 3,93	158,92 ± 7,22	76,78 ± 2,47	319,81 ± 18,45
Lodo Tratado (8 dias)	162,08 ± 5,64	4,67 ± 0,10	397,81 ± 2,67	132,63 ± 7,91	72,80 ± 2,05	306,93 ± 20,49
Lodo Tratado (9 dias)	152,65 ± 4,72	5,64 ± 0,22	431,77 ± 9,13	152,13 ± 8,49	78,93 ± 2,58	335,89 ± 13,70

Continuação da Tabela 5.12

Lodo Tratado (10 dias)	158,66 ± 4,23	6,66 ± 0,14	439,70 ± 2,50	190,71 ± 6,64	79,66 ± 2,92	337,73 ± 13,80
Lodo Tratado (11 dias)	161,36 ± 3,29	7,25 ± 0,19	447,48 ± 5,70	198,27 ± 7,32	76,04 ± 1,93	332,95 ± 18,10
Lodo Tratado (12 dias)	164,78 ± 1,95	7,54 ± 0,36	443,20 ± 5,89	153,24 ± 6,06	79,21 ± 2,35	346,75 ± 18,67
Lodo Bruto (12 dias)	524,12 ± 7,57	12,71 ± 0,44	459,50 ± 3,88	193,33 ± 5,88	202,71 ± 2,85	1339,22 ± 37,63

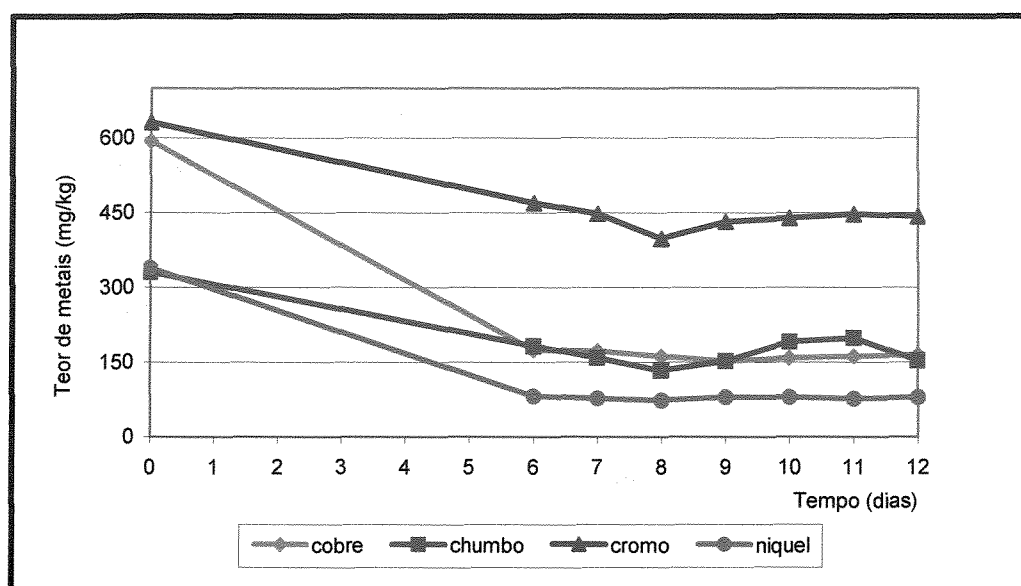


Figura 5.14 – Teor de cobre, chumbo, cromo e níquel na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento

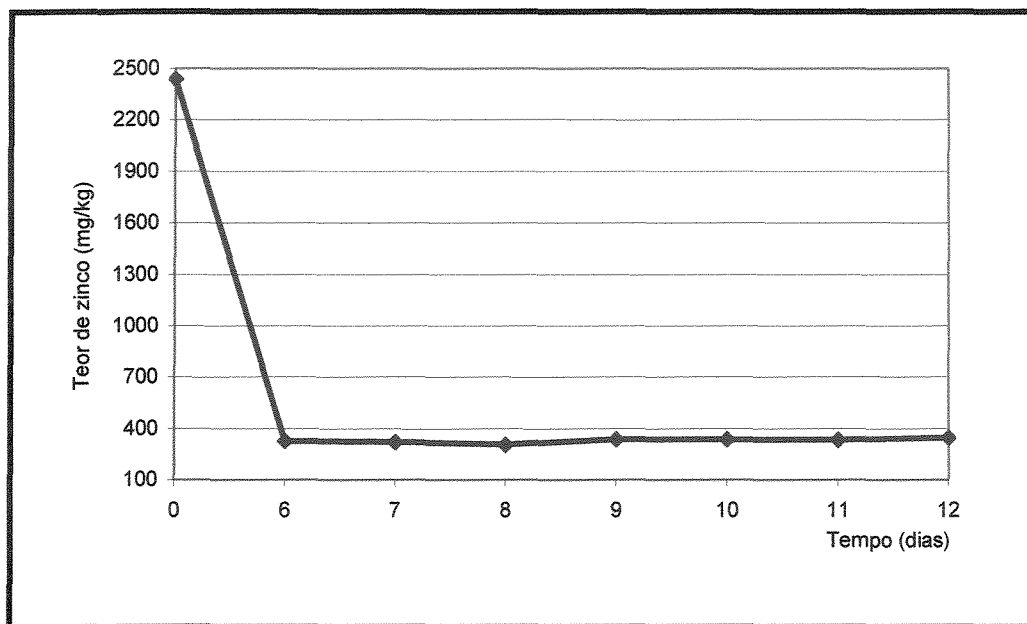


Figura 5.15 – Teor de zinco na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento

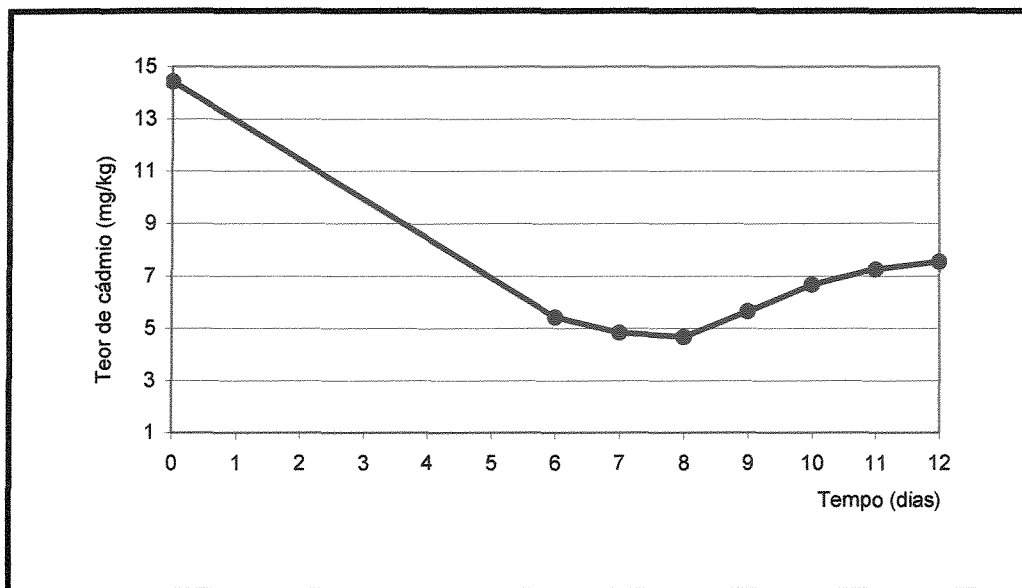


Figura 5.16 – Teor de cádmio na porção sólida do lodo tratado durante o processo de biolixiviação no terceiro experimento

Observando-se os resultados de biolixiviação de metais tanto no primeiro experimento (Figuras 5.9 e 5.10), no segundo experimento (Figuras 5.11, 5.12 e 5.13) como no terceiro experimento (Figuras 5.14, 5.15 e 5.16), verifica-se que a maior solubilização para todos os metais ocorreu em aproximadamente 8 dias, logo depois o teor de cada metal começou a aumentar. Comparando, ainda, esses mesmos resultados com o da Figura 5.5 percebe-se que a partir do oitavo dia, o pH do lodo tratado durante a biolixiviação começou a subir, isto poderia estar diminuindo a solubilização dos metais, visto que o meio se tornou menos ácido.

5.7 EFICIÊNCIA DA BIOLIXIVIAÇÃO DE METAIS NA PORÇÃO SÓLIDA DO LODO APÓS 12 DIAS DE PROCESSO

A eficiência de biolixiviação para os metais é apresentada na Tabela 5.13 e nas Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 para os três experimentos de biolixiviação realizados. Os resultados são baseados no teor de metal encontrado no oitavo dia de processo, visto que para a maioria dos mesmos foi o valor mais elevado de solubilização. Sendo assim, os metais que apresentaram maior eficiência de solubilização no lodo tratado biologicamente foram níquel e zinco, com uma média dos três experimentos de 80 e 85%, respectivamente. No lodo bruto controle, os metais que apresentaram maior solubilização durante o período de fermentação nos três experimentos foram zinco, chumbo e níquel, tendo como média 67, 42 e 41%, respectivamente. O metal que apresentou menor eficiência de solubilização foi o cromo, com uma média de 22% no lodo bruto controle e 40% no lodo tratado biologicamente.

Observando-se as Figuras 5.17, 5.18 e 5.19, verifica-se que a remoção de metais no lodo tratado biologicamente quando comparada com a do lodo bruto controle é bastante eficiente, com exceção do zinco que apresentou uma ótima eficiência nos dois casos.

Tabela 5.13 – Porcentagem de solubilização dos metais após 12 dias de biolixiviação na porção sólida do lodo de Barueri

		Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Primeira	Controle	35	-	18	38	44	71
Biolixiviação	<i>ferrooxidans</i>						
	+	71	-	33	64	84	85
	<i>thiooxidans</i>						
Segunda	Controle	33	15	21	47	39	68
Biolixiviação	<i>Ferrooxidans</i>						
	+	62	74	49	62	79	83
	<i>thiooxidans</i>						
Terceira	Controle	12	12	27	41	40	45
Biolixiviação	<i>Ferrooxidans</i>						
	+	74	68	37	60	78	87
	<i>thiooxidans</i>						

Comparando-se, ainda, a porcentagem de solubilização dos metais cobre, níquel e zinco para o terceiro experimento obtido neste estudo (Tabela 5.13) com os resultados do teor de metais no mesmo lodo determinados pelo Instituto Agrônomo de Campinas (Tabela 5.5), observa-se que o valor foi praticamente o mesmo, com exceção do níquel que teve uma eficiência de 6% maior no resultado do IAC.

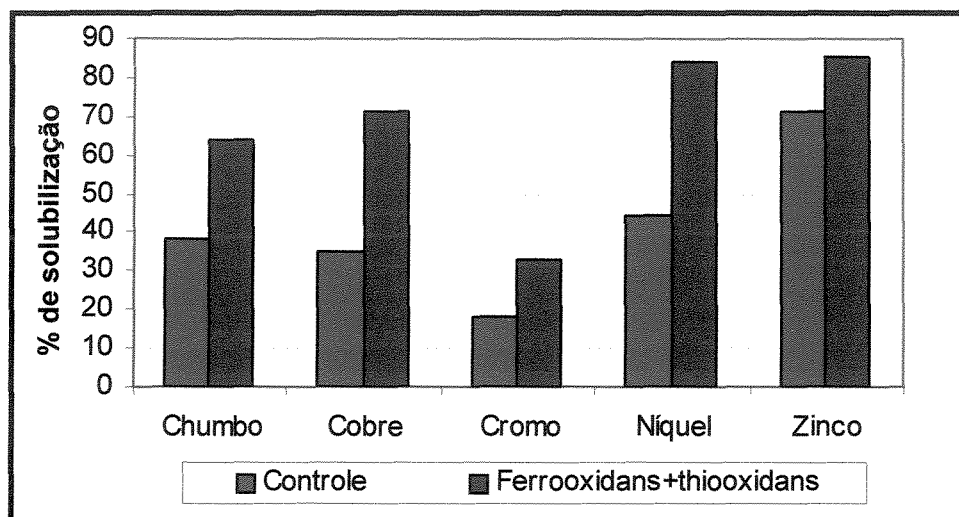


Figura 5.17 – Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na primeira biolixiviação

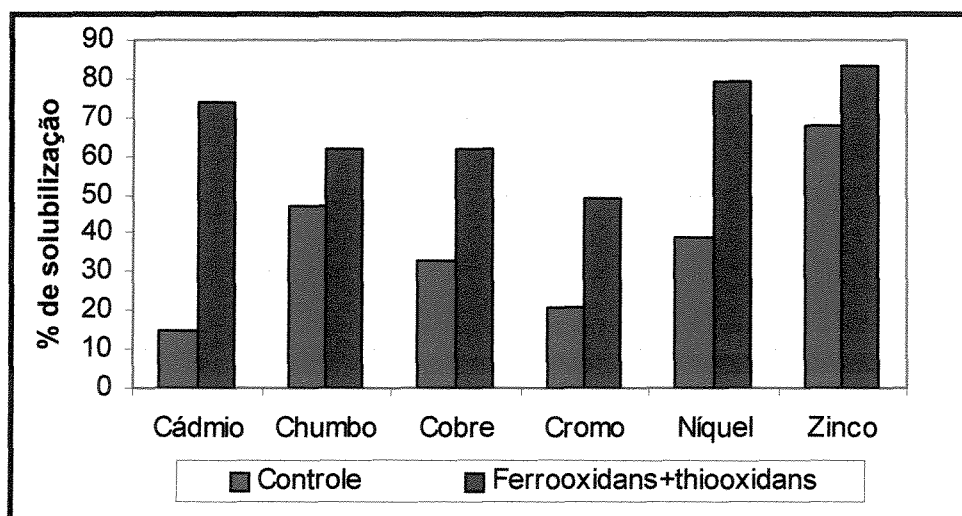


Figura 5.18 – Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na segunda biolixiviação

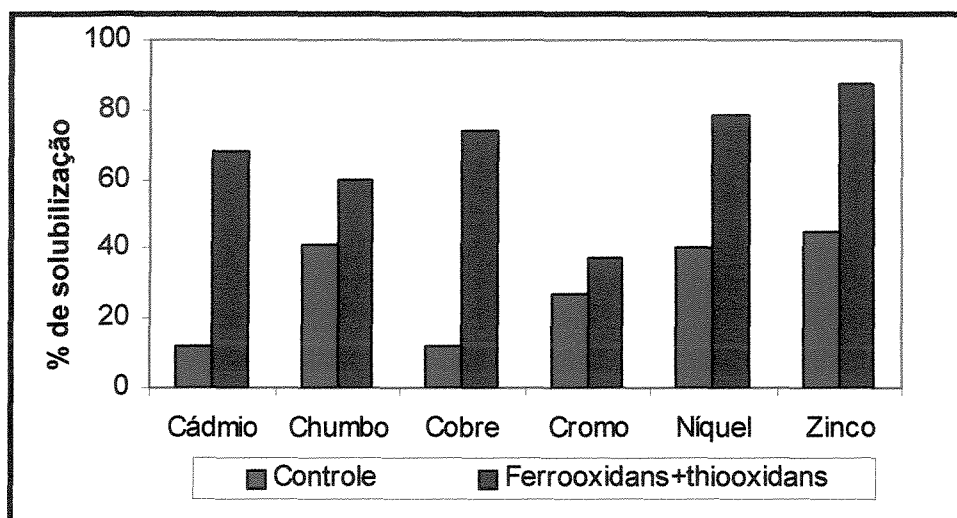


Figura 5.19 – Porcentagem de remoção de metais tanto no lodo bruto controle como no lodo tratado biologicamente na terceira biolixiviação

Comparando-se os resultados desse trabalho (Tabela 5.13) com os resultados encontrados por TYAGI, R.D. *et al.* (1988) para lodo digerido anaerobiamente (Tabela 5.14), verifica-se que os valores para cobre, chumbo e zinco foram bastante próximos e que o cádmio apresentou uma eficiência melhor neste estudo. Estas variações ocorridas deve-se provavelmente às diferentes características físico-químicas de cada lodo.

TYAGI, R.D. *et al.* (1988) mostraram que 95% zinco, 75% cobre, 55% de chumbo e 50% cádmio foram removidos em 10 dias no lodo pré-acidificado para pH 4 com H_2SO_4 , em experimento batelada. Concluíram, ainda, que o experimento com uma cultura mista (*Acidithiobacillus ferrooxidans* + *Acidithiobacillus thiooxidans*) apresentou melhores resultados do que aquele com uma única cultura (*Acidithiobacillus ferrooxidans*).

Tabela 5.14 - Porcentagem máxima de remoção do teor de metais após 12 dias de biolixiviação no lodo de Québec, Canadá

Lodo	% de remoção do teor de metais					
	Cobre	Cádmio	Cromo	Chumbo	Níquel	Zinco
Controle	30	30	-	15	-	80
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	65	40	-	47	-	90
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> +	75	50	-	55	-	97
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>						

Fonte: TYAGI *et al.* (1988).

No estudo da biolixiviação de lodo anaeróbio pré-acidificado para pH 4, WONG e HENRY (1983) alcançaram uma remoção de 87% para zinco, 86% para cádmio, 78% para níquel e 65% para cobre em 8 dias de experimento. Os mesmos autores, ainda concluíram que o processo de biolixiviação não afeta as condicionantes do solo e as propriedades fertilizantes do lodo e que 90% dos microrganismos heterotróficos são eliminados depois do tratamento.

Os trabalhos de TYAGI *et al.* (1988) e WONRY e HENRY (1983) analisaram a eficiência da biolixiviação de metais em lodo de esgoto em vários dias de processo.

No presente trabalho, além de avaliar o processo de biolixiviação para remoção de metais no lodo de Barueri, ainda utilizou-se o lodo biolixiviado na agricultura, avaliando o teor de metais na cultura do feijão.

As características químicas de cada lodo pode variar de um local para outro de acordo com: o tipo de processo utilizado na ETE, a época do ano, o estilo de vida da população, a atividade industrial, entre outros. Por isso, é muito importante conhecer as características física e química de cada lodo de esgoto em estudo.

5.8 AVALIAÇÃO DA PLANTA TESTE FEIJÃO

5.8.1 Produtividade da semente de feijão

Na Figura 5.20 pode-se visualizar o plantio realizado com o adubo mineral (reator 1), lodo bruto (reator 2) e lodo tratado biologicamente (reator 3) no primeiro experimento. Como pode ser visto na figura, o desenvolvimento do feijão com o adubo mineral (reator 1) não foi satisfatório, provavelmente no momento do plantio houve algum erro na dosagem do adubo mineral ou na forma de plantar. Desta forma, na realização dos outros dois plantios, feitos em setembro de 2001 e em março de 2002, cuidou-se para que a semente de feijão não entrasse em contato diretamente com a uréia, evitando a queima da mesma.



Figura 5.20 – Primeiro plantio de feijão com adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente

5.8.2 Teor de metais na semente de feijão

Na Tabela 5.15, são apresentados os resultados do teor médio de metais na semente de feijão com a aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente nos três plantios realizados. Os metais chumbo e cromo também foram analisados, entretanto, o teor dos mesmos estava abaixo do limite de detecção do aparelho.

Tabela 5.15 – Teor de metais na semente de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente

Plantios	Fertilizantes	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)			
		Cádmio	Cobre	Níquel	Zinco
Primeiro	Lodo Bruto	0,13	11,79	6,76	18,49
	Lodo Tratado	0,10	10,29	n.d.	18,81
Segundo	Adubo mineral	0,07	9,23	n.d.	21,15
	Lodo Bruto	0,14	11,82	2,14	23,42
	Lodo Tratado	0,08	10,18	n.d.	20,60
Terceiro	Adubo mineral	n.d.	9,22	n.d.	27,82
	Lodo Bruto	n.d.	11,90	2,68	27,44
	Lodo Tratado	n.d.	10,53	n.d.	27,63

n.d. – abaixo do limite de detecção do aparelho

Tabela 5.16 – Teores máximos de metais permitidos em semente de feijão (mg.kg⁻¹)

Metais	Cádmio	Cromo	Cobre	Níquel	Chumbo	Zinco
Feijão	<0,10	0,24	10,5	5,04	0,83	39

FONTE: KEEFER *et al.*, 1986

Comparando-se os resultados de metais nas sementes de feijão, obtidos a partir dos plantios realizados com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado (Tabela 5.15) com os teores máximos de metais em semente de feijão (Tabela 5.16), observa-se que o teor dos metais cádmio (primeiro e segundo

plantios), cobre (em todos os plantios) e níquel (primeiro plantio) ultrapassou o nível máximo recomendado, quando usou-se o lodo bruto. Isto demonstra que embora os teores desses metais estejam dentro dos limites da norma de lodos de esgotos, seus teores na semente de feijão estão além do máximo permitido para cultura. Por isso, deve-se ter um maior cuidado quando da aplicação do lodo de esgoto seguindo as normas de metais estabelecidas.

5.8.3 Teor de metais na folha de feijão

Na Tabela 5.17, são apresentados os resultados do teor de metais na folha de feijão com a aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente nos segundo e terceiro plantios realizados. O teor de níquel ficou abaixo do limite de detecção do aparelho.

Tabela 5.17 – Teor de metais na folha de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente

Plantios	Fertilizantes	Teor de metais (mg.kg ⁻¹)				
		Cádmio	Chumbo	Cobre	Cromo	Zinco
Segundo	Adubo mineral	1,01	3,04	8,19	3,76	57,07
	Lodo Bruto	1,08	2,25	12,60	3,65	65,31
	Lodo Tratado	1,05	1,93	11,60	3,67	61,82
Terceiro	Adubo mineral	1,00	2,92	11,85	3,17	57,36
	Lodo Bruto	1,11	3,12	13,84	3,27	65,40
	Lodo Tratado	1,03	1,81	13,20	3,26	56,64

Analisando a Tabela 5.17, percebe-se que o teor dos metais chumbo, cobre e zinco no plantio com aplicação de lodo bruto foi um pouco maior do que o encontrado nos plantios com o uso do lodo tratado ou do adubo mineral. Os metais cádmio e cromo apresentaram teores muito próximos quando do uso de qualquer um dos fertilizantes.

De uma maneira geral, pode se dizer que não houve contaminação nas folhas de feijão com o uso do lodo de esgoto, quando comparado com os resultados da aplicação de adubo mineral.

5.8.4 Teor de metais na raiz e no caule de feijão do terceiro plantio

Na Tabela 5.18, são apresentados os resultados do teor de metais na raiz e no caule do feijão com a aplicação de adubo mineral, de lodo bruto e de lodo tratado biologicamente no terceiro plantio realizado. O teor dos metais cádmio, cromo e níquel ficaram abaixo do limite de detecção do aparelho. O teor de chumbo na raiz e no caule praticamente não variou entre os três fertilizantes usados. Para o zinco, verifica-se que o teor do caule e da raiz com aplicação de adubo mineral foi maior em comparação com o uso tanto do lodo bruto como do lodo tratado biologicamente. Isto demonstra que provavelmente não houve contaminação destas partes da planta por este elemento. O teor de cobre na raiz e no caule, por sua vez, foi mais elevado quando do uso de lodo bruto. Entretanto, o teor de cobre no uso de lodo tratado foi mais baixo do que no uso de adubo mineral.

Tabela 5.18 – Teor de metais na raiz e no caule de feijão com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado do terceiro plantio

		Teor de metais (mg.kg ⁻¹)		
	Fertilizantes	Chumbo	Cobre	Zinco
Raiz	Adubo mineral	14,68	16,91	28,80
	Lodo Bruto	14,02	19,11	20,31
	Lodo Tratado	14,08	10,38	22,98
Caule	Adubo mineral	10,22	20,18	26,82
	Lodo Bruto	12,05	23,94	18,54
	Lodo Tratado	13,24	13,32	26,45

5.8.5 Teor de metais na água percolada durante os plantios

Os resultados referentes ao teor dos metais nos três experimentos, no percolado produzido durante cada plantio, estiveram abaixo do limite de detecção do método analítico empregado, o que não significa ausência destes metais na água percolada, indica apenas que, por exemplo, a quantidade de Cd foi inferior a 0,08 mg.L⁻¹ e de Cu e Zn inferior a 0,014 mg.L⁻¹.

5.9 ANÁLISE QUÍMICA DO SOLO

Na Tabela 5.19, são apresentados os resultados da análise química dos seguintes parâmetros do solo: matéria orgânica (M.O.), pH, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e capacidade de troca catiônica (CTC).

Tabela 5.19 – Análise química do solo com aplicação de adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado após cada plantio de feijão

Análises	Fertilizantes	Parâmetros do solo						
		M.O. ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	P ⁽³⁾	K ⁽⁴⁾	Ca ⁽⁴⁾	Mg ⁽⁴⁾	CTC ⁽⁴⁾
Primeira	Adubo mineral	24	4,6	4	3,2	15	4	86,6
	Lodo bruto	26	4,7	11	3,6	17	5	77,8
	Lodo tratado	34	4,5	27	3,5	20	5	108,0
Segunda	Adubo mineral	31	4,2	5	4,1	11	4	128,2
	Lodo bruto	31	4,2	29	3,7	14	3	129,8
	Lodo tratado	37	4,1	91	2,6	11	3	151,3
Terceira	Adubo mineral	28	4,5	17	3,3	18	5	105,8
	Lodo bruto	26	4,4	19	2,0	14	3	107,4
	Lodo tratado	35	4,4	80	1,5	25	6	120,9

⁽¹⁾ g.dm⁻³; ⁽²⁾ solução CaCl₂; ⁽³⁾ mg.dm⁻³; ⁽⁴⁾ mmol_c.dm⁻³

A seguir, nas Figuras 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26, é apresentada a uma comparação para cada parâmetro nas três análises de solo após cada plantio, usando adubo mineral, lodo bruto e lodo tratado biologicamente.

5.9.1 Matéria orgânica

Na Figura 5.21 é mostrado que o teor de matéria orgânica nas três análises do solo foi maior com aplicação do lodo tratado biologicamente do que com o uso do lodo bruto ou do adubo mineral. Os resultados demonstraram que, apenas na primeira análise, o teor de matéria orgânica foi maior para o lodo bruto em comparação ao adubo mineral.

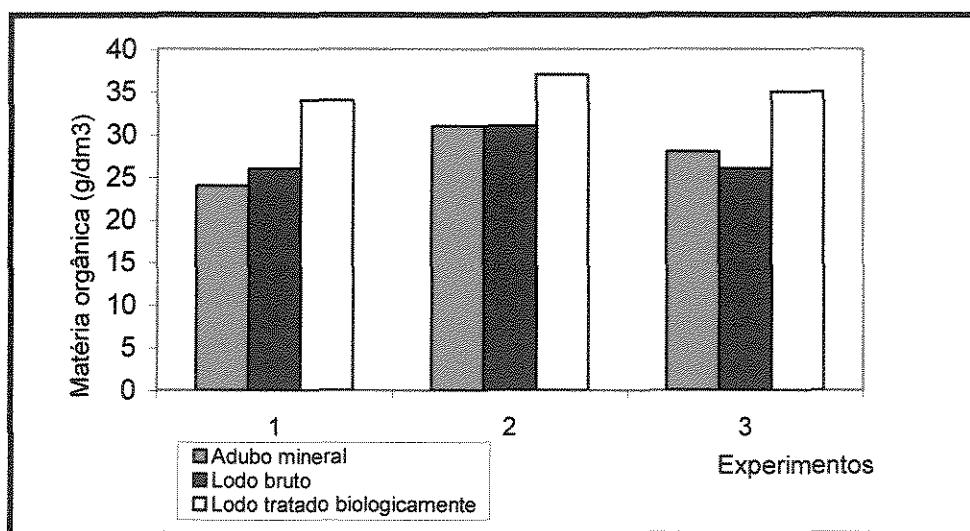


Figura 5.21 – Teor de matéria orgânica nas três análises do solo

TSUTIYA (2001) enumera as seguintes vantagens atraídas ao solo pela matéria orgânica contida no lodo de esgoto:

- ↳ favorece a formação de agregados, facilitando a penetração das raízes e a vida microbiana;
- ↳ atua junto à resistência do solo, evitando a erosão, por estabilizar a estrutura do solo;

- ↳ aumenta a capacidade de retenção de água do solo, tornando as culturas mais resistentes à seca;
- ↳ fornece nutrientes para as plantas e para os organismos do solo após a mineralização; e,
- ↳ atua como condicionador do solo.

5.9.2 Fósforo

Em relação ao fósforo, existem alguns trabalhos que levantam dúvidas sobre o potencial do lodo de esgoto em aumentar a disponibilidade desse elemento no solo (ROS *et al.*, 1993), mas a maioria das publicações apontam para expressiva contribuição do lodo de esgoto em relação ao fósforo disponível (MARQUES, 1997). Segundo o último autor, o fósforo do lodo de esgoto é menos solúvel no solo que o dos superfosfatos, mas oferece maior constância no fornecimento ao longo do tempo.

Observando-se a Figura 5.22, fica evidente o aumento do teor de fósforo com a aplicação do lodo de esgoto no solo, principalmente, com o uso do lodo tratado biologicamente.

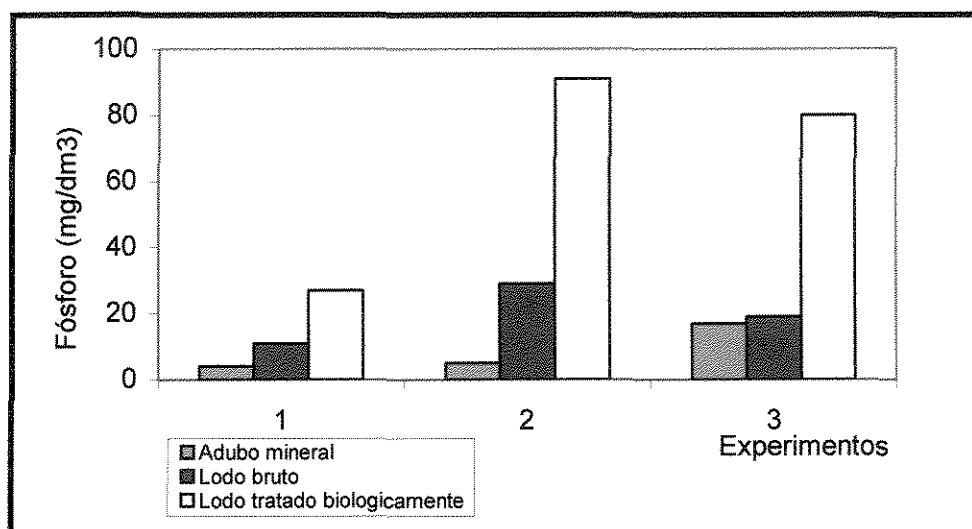


Figura 5.22 - Teor de fósforo nas três análises do solo

5.9.3 Potássio

O lodo de esgoto não tem sido uma boa fonte de potássio devido ao baixo teor encontrado no mesmo. Segundo TSUTIYA (2001), isto ocorre porque esse elemento é altamente solúvel em água e durante o processo de tratamento de esgoto, o potássio fica contido no efluente líquido. Na Figura 5.23, observa-se que o teor desse elemento decresce a partir da segunda análise, sendo esta remoção ainda mais acentuada no solo que recebeu lodo tratado biologicamente. Desta forma, para garantir o sucesso do uso agrícola do lodo, é necessário recorrer a uma complementação com uma outra fonte desse elemento.

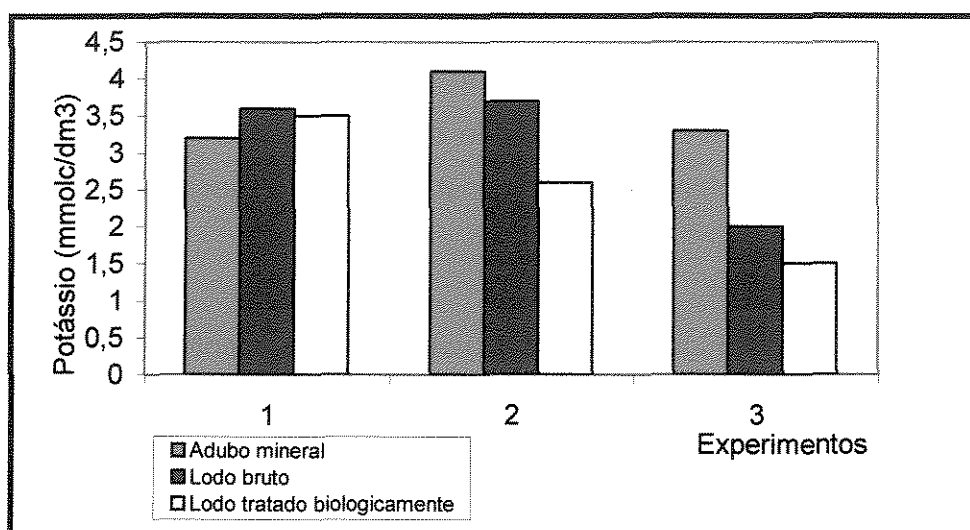


Figura 5.23 - Teor de potássio nas três análises do solo

5.9.4 Cálcio e Magnésio

Presentes no lodo, essencialmente na forma inorgânica, as concentrações destes elementos suprem as necessidades da maioria das culturas agrícolas (TSUTIYA, 2001).

Observando as Figuras 5.24 e 5.25, percebe-se que o teor de cálcio e magnésio para a maioria dos experimentos foi maior no solo que recebeu aplicação de lodo tratado biologicamente, com exceção do segundo experimento. Aumento gradual na disponibilidade destes nutrientes tem sido observado pela aplicação de lodo de esgoto no solo (MARQUES, 1997).

De um modo geral, o teor de ambos elementos variou bastante de um experimento para o outro.

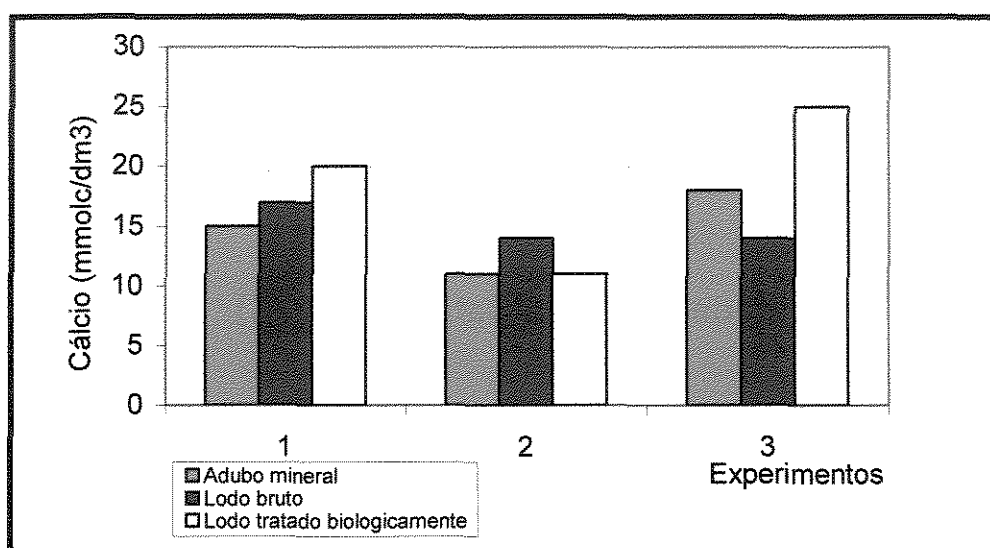


Figura 5.24 - Teor de cálcio nas três análises do solo

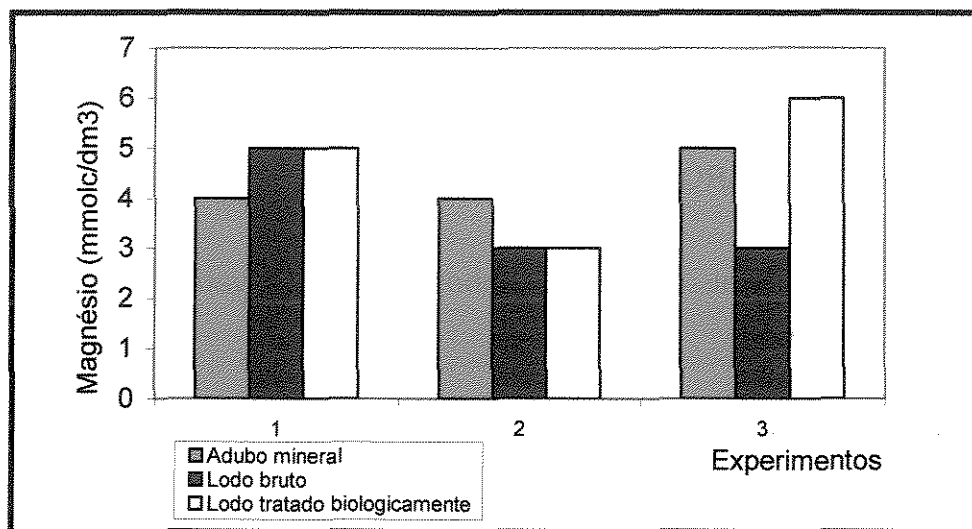


Figura 5.25 - Teor de magnésio nas três análises do solo

5.9.5 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

Na Figura 5.26, é apresentada a capacidade de troca catiônica nas três análises do solo após cada plantio.

Os solos de regiões tropicais e subtropicais possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC), por se tratarem de solos altamente intemperizados. Desta forma, aplicação de lodo de esgoto no solo causa aumento na CTC (MELO *et al.*, 1994) devido ao aumento no teor de matéria orgânica (BATAGLIA *et al.*, 1993), promovendo a liberação de nutrientes para a nutrição dos vegetais.

Comparando a Figura 5.26 com a Figura 5.21 e a Tabela 5.19, observa-se que a capacidade de troca catiônica aumentou proporcionalmente com o aumento da matéria orgânica, nos três experimentos, no solo que recebeu lodo tratado biologicamente.

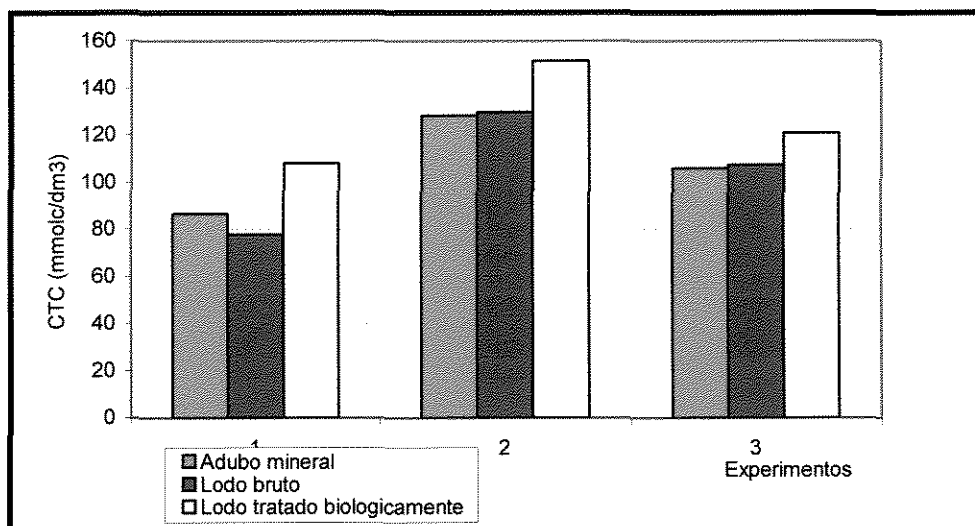


Figura 5.26 – Capacidade de troca catiônica nas três análises do solo

6. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido permitiu chegar às seguintes conclusões:

↳ O crescimento das bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* foi de aproximadamente 48 horas e 9 dias, respectivamente;

↳ O lodo submetido ao processo de biolixiviação apresentou algumas mudanças nas suas características após 12 dias de fermentação, tais como: textura que no início do experimento era bem líquida tornou-se bem mais espessa e coloração mudou de preta para marrom claro;

↳ A remoção do teor de metais foi baixa na porção sólida do lodo bruto (controle) e alta na porção sólida do lodo tratado (mistura dos dois microrganismos);

↳ A maior solubilização para todos os metais no lodo tratado biologicamente ocorreu em aproximadamente 8 dias, logo depois a eficiência começou a diminuir, provavelmente pelo aumento do pH do meio;

↳ Os metais que apresentaram maior eficiência de solubilização no lodo tratado biologicamente foram níquel e zinco, com uma média dos três experimentos de 80 e 85%, respectivamente;

✎ No lodo bruto controle, os metais que apresentaram maior solubilização durante o período de fermentação nos três experimentos foram zinco, chumbo e níquel, tendo como média 67, 42 e 41%, respectivamente;

✎ O metal que apresentou menor eficiência de solubilização foi o cromo, com uma média de 22% no lodo bruto controle e 40% no lodo tratado biologicamente;

✎ O teor de fósforo, de nitrogênio e de matéria orgânica no lodo tratado biologicamente aumentou aproximadamente 22, 9 e 10%, respectivamente, em relação ao lodo bruto. Entretanto, o potássio e o cálcio tiveram um decréscimo de 25 e 83%, respectivamente, no lodo tratado.

✎ O teor dos metais cádmio (primeiro e segundo plantios), cobre (em todos os plantios) e níquel (primeiro plantio) ultrapassou o nível máximo recomendado, quando usou-se o lodo bruto. Isto demonstra que embora o teor desses metais estejam dentro dos limites da norma de lodos de esgotos, seus teores na semente de feijão estão além do máximo permitido para cultura;

✎ As análises do teor de metais na folha, no caule e na raiz da planta de feijão não apresentaram diferenças entre os fertilizantes (lodo bruto, lodo tratado biologicamente e adubo mineral);

✎ O teor de metais na água percolada durante os três plantios de feijão ficou abaixo do limite de detecção do aparelho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

↪ Avaliação dos custos do processo de biolixiviação para redução de metais em lodo de esgoto, principalmente em relação ao ácido requerido para ajustar o pH do meio;

↪ Determinação do teor de mercúrio no lodo de esgoto, no solo e na planta;

↪ Caracterização microbiológica do lodo bruto e do lodo tratado (com duas suspensões de bactérias);

↪ Realização de um balanço de massa de metais nos compartimentos lodo/solo/planta/água.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEM SOBRINHO, P.; TSUTIYA, M.T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 1ed., São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999. 548p.
- ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; ILHENFELD, R.G.K. **Uso e manejo do lodo de esgotona agricultura**. Rio de Janeiro: Sanepar/Prosab/Finep, 1999. 97p.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S. Gestão de bio sólidos: Situação e perspectivas. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.11-18.
- ANDREWS, G.F.; MACZUGA, J. Bacterial coal desulfurization. **Biotechnology Bioengineering Symposium**, n.12, p.337-48, 1982.
- ANGELUCCI, E. Contaminantes metálicos em alimentos. Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), 1981.
- ANJOS, A.R.M. **Lixiviação de espécies químicas em latossolos sucessivamente tratados com bio sólido e disponibilidade de metais pesados para plantas de milho**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999. p.166.

- BATAGLIA, O.C.; BERTON, R.S.; CAMARGO, A.O.; VALADARES, J.M.A.S. Resíduos orgânicos como fonte de nitrogênio para capim-braquiária. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.7, p.277-284, 1983.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.13, n.2, p.187-192, 1989.
- BERTON, R.S.; PRATI, P.F.; FRANKENBERGER JR., W.T. Phosphorus availability in soils amended with organic materials, estimated by three chemical methods and two enzyme activities. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.21, p.617-624, 1997a.
- BERTONCINI, E.I. **Mobilidade de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1997.p.90.
- BETTIOL, W. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. In: Colóquio Regional sobre Matéria Orgânica do solo, Piracicaba, 1982. **Anais...** Piracicaba : CENA, 1982. p.227-232.
- BETTIOL, W; Carvalho, P.C.T.; Franco, B.J.D.C. Utilização do lodo de esgoto como fertilizante. **O Solo**, v.75, n.1, p.44-54, 1983.
- BISCAIA, R.C.M.; MIRANDA, G.M. Uso do lodo de esgoto calado na produção de milho. **Sanare**, v.5, p.86-89, 1996.
- BOARETTO, A.E. Uso de lodo de esgoto como fertilizante. Botucatu: UNESP, 1986. 185p.

- CHANG, A.C; HYUN, H.; PAGE, A.L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composed sewage sludge treated field plots: plateau or time bombs? **Journal of Environmental Quality**, v.26, n.1, p.11-19, 1997.
- CHIARADIA, A.N.; GOMES, J.C. **Feijão: química, nutrição e tecnologia**. Viçosa : Fundação Arthur Bernardes, 1997. 180p.
- CHRISTODOULAKIS, N.S.; MARGARIS, N.S. Growth of corn (*Zea mays*) and sunflower (*Helianthus annuus*) plants is affected by water and some sludge from a sewage treatment plant. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.57, n.2, p.300-306. 1996.
- COMPANHIA DE ÁGUAS E ESGOTO DE BRASÍLIA (CAESB). **O lodo de esgotos na agricultura**. Brasília, 1996.
- COUILLARD, D.; CHARTIER, M. Removal of metals from aerobic sludges by biological solubilization in batch reactors. **Journal of Biotechnology**, v.20, p.163-180, 1991.
- COUILLARD, D.; CHARTIER, M.; MERCIER, G. Bacterial leaching of heavy metals from aerobic sludge. **Bioresource Technology**, v.36, n.3, p.293-302, 1991.
- COUILLARD, D.; MERCIER, G. An economic evaluation of biological removal of heavy metals from wastewater sludge. **Water Environmental Research**, v.66, n.1, p.32-38, 1994.
- DASSENAKIS, M.I.; KLOUKINIOTOU, M.A.; PAVLIDOU, A.S. The influence of long existing pollution on trace metal levels in a small tidal mediterranean bay. **Marine Pollution Bulletin**, v.32, n.3, p.275-282, 1996.
- DE DEUS, A.B.S. Avaliação sanitária e ambiental de lodos de ETE's. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. p.105.

- FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.45-67.
- FRANÇA, R.G. **Metais pesados nos sedimentos do Sul da Lagoa dos Patos: Identificação do melhor normalizante geoquímico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande, 1998. p.90.
- GARCIA, O.; BIGHAN, J.M.; TUOVINEN, O.H. Oxidation of Galena by Thiobacillus-Ferrooxidans and Thiobacillus-Thiooxidans. **Canadian Journal of Microbiology**, v.41, n.6, p.508-514, 1995.
- HALL, J. Standardising and the management of biosolids the international experience. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIODSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.113-122.
- JAIN, D.K.; TYAGI, R.D. Leaching of heavy metals from anaerobic sewage sludge by sulfur-oxidizing bacteria. **Enzyme Microbial Technology**, v.14, n.5, p.376-383, 1992.
- JING, J.; LOGAN, T.J. Effects of sewage sludge cadmium concentration on chemical extractability and plant uptake. **Journal of Environmental Quality**, v.21, n.1, p.73-81, 1992.
- KEEFER, R.F.; SINGH, R.N.; HORVATH, D.J. Chemical composition of vegetables grown on na agricultural soil amended with sewage sludges. **Journal Environmental Quality**, v.15, no 2, p.146, 1986.
- KIM. S.J.; CHANG, A.C.; PAGE, A.L.; WARNEKE, J.E. Relative concentrations of cadmium and zinc in tissue of selected food plants grown on sludge-treated soils. **Journal of Environmental Quality**, v.17, n.14, p.568-573, 1988.

- LOON, J.V.C. Selected Methods of Trace Metal Analysis: Biological and Environmental Samples. New York : Wiley-Interscience Publication, 1985. p.257.
- LOURENÇO, R.S.; ANJOS, A.R.M; MEDRADO, M.J.S. Efeito do lodo de esgoto na produtividade de milho e feijão no sistema de produção de bractina. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Viçosa, 1995. **Anais...Viçosa** : SBCS/UFV, 1995. p.2273-2275.
- MARQUES, M. O. **Efeitos da aplicação do lodo de esgoto na produtividade e qualidade da cana-de-açúcar**. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990. p.164.
- MARQUES, M.O. **Incorporação de lodo de esgoto em solo cultivado com cana-de-açúcar**. Jabotical: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, 1997. 111p. Tese de Livre Docência.
- MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B.G.M.; DEMING, S.N.; MICHOTTE, Y.; KAUFMANN, L. **Chemometrix**. Amsterdam : Elsevier, 1988.
- McBRIDE, M.B. Toxic Metal Accumulation From Agricultural Use Of Sludge - Are Usepa Regulations Protective. **Journal Of Environmental Quality**, v. 24, n.1, p. 5-18, 1995.
- McGRATH, S.P.; CHANG, A.C.; PAGE, A.L; WITTER, E. Land application of sewage sludge: scientific perspectives of heavy metal loading limits in Europe and the United States. **Environmental Review**, v.2, p.108-118, 1994.
- MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A.; LEITE, S.A.S. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.18, p.449-455, 1994.

- METCALF; EDDY INC. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3ed., New York: McGraw Hill, 1991. 1334p.
- PROSAB (PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO). **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Rio de Janeiro, 1999.
- NOGUCHI, H.; ITO, H. Long-term experiment of applying sludge fertilizer to agricultural land. **Journal of the Institution of Water and Environmental Management**, v.6, n.5, p.576, 1992.
- NOVO, M.T.M. **Variabilidade genética em *Thiobacillus* spp. E efeitos de metais pesados em *Thiobacillus ferrooxidans***. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- OLIVEIRA, F.C. **Metais pesados e formas nitrogenadas em solos tratados com lodo de esgoto**. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995. p.90.
- RADWAN, F.I. Effect of sewage sludge on some sunflower and barley characteristics. **Annal of Agricultural Sciences**, v.29, n.4, p. 1333-1344, 1991.
- ROGALLA, F. Produção, caracterização e processamento de bio sólidos. In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.35-40.
- ROS, C.O; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-preta-ervilhaca. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.17, p.257-261, 1993.

- SANTOS, H.F. Normas e critérios para o uso agrícola dos bio sólidos de estações de tratamento de esgotos (ETEs). In: SEMINÁRIO SOBRE GERENCIAMENTO DE BIOSSÓLIDOS DO MERCOSUL, 1. **Anais...** Curitiba: SANEPAR/ABES, 1998. p.123-129.
- SERGIENKO, L.I.; MOSIENKO, N.A.; TYAN, V.P. Heavy metal content of ecosystems when sewage sludge is used as fertilizer. **Soviet Agricultural Sciences**, v.8, p.55-57, 1991.
- SILVA, F.C. **Uso agrônômico de lodo de esgoto: efeitos em fertilidade do solo e qualidade da cana-de-açúcar. Piracicaba.** Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995. p.159.
- SILVERMAN, M.P.; LUNDGREN, D.G. Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*. I. Na improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. **Journal Bacteriology**, n.77, p.642-647, 1959.
- TSUTIYA, M. T. Bio sólidos na Agricultura. São Paulo: SABESP, 2001.
- TSUTIYA, M. T. Alternativas de disposição final de bio sólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.69-105.
- TSUTIYA, M.T. Metais pesados: o principal fator limitante para o uso agrícola de bio sólidos das estações de tratamento de esgotos. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, 1999. **Anais...** Rio de Janeiro : ABES, 1999. p.753-761.

- TUOVINEN, O.H.; KELLY, D.P. Studies on the growth of *Thiobacillus ferrooxidans*. I. Use of membrane filters and ferrous iron agar to determine viable number and comparison CO₂ fixation and iron oxidation as measures of growth. **Archives Microbiology**, n.88, p.285-298, 1973.
- TYAGI, D.; COUILLARD, D.; TRAN, F. Heavy metals removal from anaerobically digested sludge by chemical and microbiological methods. **Environmental Pollution**, v.50, p.295, 1988.
- TYAGI, D.; COUILLARD, D.; GRENIER, Y. Effects of medium composition on the Bacterial Leaching of Metals from Digested Sludge. **Environmental Pollution**, v.71, p.57-67, 1991.
- TYAGI, D.; BLAIS, J.F.; AUCLAIR, J.C.; MEUNIER, N. Bacterial leaching of toxic metals from municipal sludge: influence of sludge characteristics. **Water Environmental Research**, v.65, n.3, p.196, 1993.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL PROGRAMME (UNEP). Chemical pollution: a global overview. United Nations Environment Programme, 1992. p.106.
- VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte, MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA. Universidade Federal de Minas Gerais, vol.1, 1996.
- WINDOM, H.L.; SCHROPP, S.J.; CALDER, F.D.; RYAN, J.D.; SMITH, R.; BURNEY, L.C.; LEWIS, F.G.; RAWLINSON. Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the Southeastern United States. **Environmental Science Technology**, v.23, p.314, 1989.
- WONG, L.; HENRY, J.G. Bacterial leaching of heavy metals from anaerobically digested sewage sludge. **Water Pollution Resource Journal Canada**, v.18, p.151-162, 1983.

ANEXO A

Anexo A – 1
Teor de chumbo na porção sólida do lodo durante a primeira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 26/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,93	25	0,2472	94,05
2	1,02	25	0,2471	103,20
3	0,96	25	0,2430	98,77
4	0,97	25	0,2517	96,34
5	1,00	25	0,2551	98,00
Média				98,07
Desvio padrão				3,39

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 28/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,63	25	0,2510	62,75
2	0,56	25	0,2516	55,64
3	0,57	25	0,2465	57,81
4	0,58	25	0,2529	57,33
5	0,61	25	0,2533	60,21
Média				58,75
Desvio padrão				2,77

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,22	25	0,2534	120,36
2	1,29	25	0,2550	126,47
3	1,20	25	0,2500	120,00
4	1,30	25	0,2509	129,53
5	1,19	25	0,2523	117,92
Média				122,86
Desvio padrão				4,91

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,02	25	0,2534	100,63
2	1,05	25	0,2550	102,94
3	0,99	25	0,2500	99,00
4	1,02	25	0,2518	101,27
5	1,04	25	0,2474	105,09
Média				101,79
Desvio padrão				2,33

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 20/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,57	25	0,2473	158,71
2	1,59	25	0,2473	160,74
3	1,63	25	0,2491	163,59
4	1,61	25	0,2491	161,58
5	1,68	25	0,2503	167,80
6	1,69	25	0,2503	168,80
Média				163,54
Desvio padrão				4,02

Anexo A – 2
Teor de cobre na porção sólida do lodo durante a primeira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 26/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,74	25	0,2472	175,97
2	1,71	25	0,2471	173,01
3	1,81	25	0,2430	186,21
4	1,84	25	0,2517	182,76
5	1,84	25	0,2551	180,32
Média				179,65
Desvio padrão				5,26

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 28/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,64	25	0,2510	163,35
2	1,58	25	0,2516	157,00
3	1,63	25	0,2465	165,31
4	1,55	25	0,2529	153,22
5	1,52	25	0,2533	150,02
Média				157,78
Desvio padrão				6,51

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,26	25	0,2534	321,63
2	3,11	25	0,2550	304,90
3	3,22	25	0,2500	322,00
4	3,15	25	0,2509	313,87
5	3,42	25	0,2523	338,88
Média				320,26
Desvio padrão				12,53

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,54	25	0,2534	349,25
2	3,52	25	0,2550	345,10
3	3,59	25	0,2500	359,00
4	3,58	25	0,2518	355,44
5	3,51	25	0,2474	354,69
Média				352,70
Desvio padrão				5,50

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 20/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	5,34	25	0,2473	539,83
2	5,33	25	0,2473	538,82
3	5,39	25	0,2491	540,95
4	5,37	25	0,2491	538,94
5	5,4	25	0,2503	539,35
6	5,42	25	0,2503	541,35
Média				539,87
Desvio padrão				1,06

Anexo A – 3
Teor de cromo na porção sólida do lodo durante a primeira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 26/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,85	25	0,2472	490,49
2	4,78	25	0,2471	483,61
3	4,82	25	0,2430	495,88
4	5,01	25	0,2517	497,62
5	5,12	25	0,2551	501,76
Média				493,87
Desvio padrão				7,02

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 28/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,76	25	0,2510	374,50
2	3,75	25	0,2516	372,62
3	3,76	25	0,2465	381,34
4	3,69	25	0,2529	364,77
5	3,75	25	0,2533	370,11
Média				372,67
Desvio padrão				6,07

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,45	25	0,2534	439,03
2	4,42	25	0,2550	433,33
3	4,48	25	0,2500	448,00
4	4,39	25	0,2509	437,43
5	4,43	25	0,2523	438,96
Média				439,35
Desvio padrão				5,36

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,62	25	0,2534	455,80
2	4,58	25	0,2550	449,02
3	4,63	25	0,2500	463,00
4	4,59	25	0,2518	455,72
5	4,62	25	0,2474	466,86
Média				458,08
Desvio padrão				6,97

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 20/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	5,66	25	0,2473	572,18
2	5,64	25	0,2473	570,16
3	5,52	25	0,2491	553,99
4	5,53	25	0,2491	555,00
5	5,49	25	0,2503	548,34
6	5,51	25	0,2503	550,34
Média				558,34
Desvio padrão				10,25

Anexo A – 4

Teor de níquel na porção sólida do lodo durante a primeira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 26/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,09	25	0,2472	110,23
2	1,13	25	0,2471	114,33
3	1,17	25	0,2430	120,37
4	1,19	25	0,2517	118,20
5	1,21	25	0,2551	118,58
Média				116,34
Desvio padrão				4,06

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 28/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,74	25	0,2510	73,71
2	0,79	25	0,2516	78,50
3	0,69	25	0,2465	69,98
4	0,78	25	0,2529	77,11
5	0,81	25	0,2533	79,94
Média				75,85
Desvio padrão				4,01

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,76	25	0,2534	173,64
2	1,72	25	0,2550	168,63
3	1,6	25	0,2500	160,00
4	1,73	25	0,2509	172,38
5	1,7	25	0,2523	168,45
Média				168,62
Desvio padrão				5,33

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,67	25	0,2534	263,42
2	2,63	25	0,2550	257,84
3	2,73	25	0,2500	273,00
4	2,68	25	0,2518	266,08
5	2,71	25	0,2474	273,85
Média				266,84
Desvio padrão				6,71

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 20/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,61	25	0,2473	466,03
2	4,65	25	0,2473	470,08
3	4,88	25	0,2491	489,76
4	4,89	25	0,2491	490,77
5	4,72	25	0,2503	471,43
6	4,72	25	0,2503	471,43
Média				476,58
Desvio padrão				10,78

Anexo A – 5
Teor de zinco na porção sólida do lodo durante a primeira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 26/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,235	25	25	0,2472	594,15
2	0,24	25	25	0,2471	607,04
3	0,237	25	25	0,2430	609,57
4	0,241	25	25	0,2517	598,43
5	0,236	25	25	0,2551	578,20
Média					597,48
Desvio padrão					12,46

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 28/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)		Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,145	25	25	0,2510	361,06
2	0,164	25	25	0,2516	407,39
3	0,152	25	25	0,2465	385,40
4	0,153	25	25	0,2529	378,11
5	0,150	25	25	0,2533	370,11
Média					380,41
Desvio padrão					17,60

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)		Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,258	25	25	0,2534	636,35
2	0,253	25	25	0,2550	620,10
3	0,261	25	25	0,2500	652,50
4	0,263	25	25	0,2509	655,14
5	0,255	25	25	0,2523	631,69
Média					639,15
Desvio padrão					14,67

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 01/02/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)		Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,288	25	25	0,2534	710,34
2	0,285	25	25	0,2550	698,53
3	0,282	25	25	0,2500	705,00
4	0,293	25	25	0,2518	727,26
5	0,289	25	25	0,2474	730,09
Média					714,25
Desvio padrão					13,86

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 20/01/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)		Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,96	25	25	0,2473	2426,20
2	0,97	25	25	0,2473	2451,48
3	0,98	25	25	0,2491	2458,85
4	0,98	25	25	0,2491	2458,85
5	0,99	25	25	0,2503	2472,03
6	1,01	25	25	0,2503	2521,97
Média					2464,90
Desvio padrão					31,81

ANEXO B

Anexo B – 1
Teor de cádmio na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,016	25	0,2497	1,60
2	0,018	25	0,2486	1,81
3	0,015	25	0,2486	1,51
4	0,018	25	0,2494	1,80
5	0,017	25	0,2486	1,71
6	0,015	25	0,2505	1,50
Média				1,66
Desvio padrão				0,14

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,015	25	0,2489	1,51
2	0,012	25	0,2473	1,21
3	0,014	25	0,2499	1,40
4	0,013	25	0,2488	1,31
5	0,014	25	0,2493	1,40
6	0,012	25	0,2508	1,20
Média				1,34
Desvio padrão				0,12

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,009	25	0,2475	0,91
2	0,011	25	0,2507	1,10
3	0,010	25	0,2480	1,01
4	0,012	25	0,2485	1,21
5	0,011	25	0,2484	1,11
6	0,013	25	0,2489	1,31
Média				1,11
Desvio padrão				0,14

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,015	25	0,2479	1,51
2	0,016	25	0,2493	1,60
3	0,016	25	0,2467	1,62
4	0,018	25	0,2494	1,80
5	0,015	25	0,2492	1,50
6	0,014	25	0,2501	1,40
Média				1,57
Desvio padrão				0,14

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,024	25	0,2485	2,41
2	0,019	25	0,2482	1,91
3	0,025	25	0,2485	2,52
4	0,023	25	0,2506	2,29
5	0,025	25	0,2485	2,52
6	0,022	25	0,2481	2,22
Média				2,31
Desvio padrão				0,23

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,028	25	0,2481	2,82
2	0,029	25	0,2485	2,92
3	0,027	25	0,2486	2,72
4	0,028	25	0,2487	2,81
5	0,025	25	0,2480	2,52
6	0,029	25	0,2498	2,90
Média				2,78
Desvio padrão				0,15

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,034	25	0,2487	3,42
2	0,033	25	0,2482	3,32
3	0,036	25	0,2487	3,62
4	0,036	25	0,2482	3,63
5	0,037	25	0,2496	3,71
6	0,038	25	0,2484	3,82
Média				3,59
Desvio padrão				0,18

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,042	25	0,2497	4,21
2	0,039	25	0,2489	3,92
3	0,043	25	0,2475	4,34
4	0,041	25	0,2479	4,13
5	0,038	25	0,2485	3,82
6	0,04	25	0,2481	4,23
Média				4,11
Desvio padrão				0,20

Anexo B – 2
Teor de chumbo na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,65	25	0,2497	165,20
2	1,58	25	0,2486	158,89
3	1,55	25	0,2486	155,87
4	1,42	25	0,2494	142,34
5	1,44	25	0,2486	144,81
6	1,48	25	0,2505	147,70
Média				152,47
Desvio padrão				8,93

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,45	25	0,2489	145,64
2	1,38	25	0,2473	139,51
3	1,39	25	0,2499	139,06
4	1,36	25	0,2488	136,66
5	1,38	25	0,2493	138,39
6	1,41	25	0,2508	140,55
Média				139,97
Desvio padrão				3,07

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,17	25	0,2475	118,18
2	1,27	25	0,2507	126,65
3	1,27	25	0,2480	128,02
4	1,21	25	0,2485	121,73
5	1,16	25	0,2484	116,75
6	1,07	25	0,2489	107,47
Média				119,80
Desvio padrão				7,51

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,34	25	0,2479	135,14
2	1,28	25	0,2493	128,36
3	1,36	25	0,2467	137,82
4	1,27	25	0,2494	127,31
5	1,31	25	0,2492	131,42
6	1,43	25	0,2501	142,94
Média				133,83
Desvio padrão				5,98

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,47	25	0,2485	147,89
2	1,46	25	0,2482	147,06
3	1,42	25	0,2485	142,86
4	1,39	25	0,2506	138,67
5	1,41	25	0,2485	141,85
6	1,49	25	0,2481	150,14
Média				144,74
Desvio padrão				4,32

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,38	25	0,2481	139,06
2	1,38	25	0,2485	138,83
3	1,36	25	0,2486	136,77
4	1,29	25	0,2487	129,67
5	1,39	25	0,2480	140,12
6	1,34	25	0,2498	134,11
Média				136,43
Desvio padrão				3,94

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação -25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,67	25	0,2487	167,87
2	1,63	25	0,2482	164,18
3	1,68	25	0,2487	168,88
4	1,74	25	0,2482	175,26
5	1,68	25	0,2496	168,27
6	1,72	25	0,2484	173,11
Média				169,60
Desvio padrão				3,97

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,22	25	0,2497	322,39
2	3,14	25	0,2489	315,39
3	3,17	25	0,2475	320,20
4	3,21	25	0,2479	323,72
5	3,12	25	0,2485	313,88
6	3,14	25	0,2481	316,40
Média				318,66
Desvio padrão				4,01

Anexo B – 3
Teor de cobre na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,45	25	0,2497	345,41
2	3,28	25	0,2486	329,85
3	3,31	25	0,2486	332,86
4	3,40	25	0,2494	340,82
5	3,39	25	0,2486	340,91
6	3,32	25	0,2505	331,34
Média				336,87
Desvio padrão				6,34

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,53	25	0,2489	254,12
2	2,57	25	0,2473	259,81
3	2,58	25	0,2499	258,10
4	2,65	25	0,2488	266,28
5	2,64	25	0,2493	264,74
6	2,63	25	0,2508	262,16
Média				260,87
Desvio padrão				4,48

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,07	25	0,2475	209,09
2	2,06	25	0,2507	205,42
3	2,03	25	0,2480	204,64
4	2,11	25	0,2485	212,27
5	2,07	25	0,2484	208,33
6	2,02	25	0,2489	202,89
Média				207,11
Desvio padrão				3,43

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,13	25	0,2479	214,80
2	2,21	25	0,2493	221,62
3	2,14	25	0,2467	216,86
4	2,15	25	0,2494	215,52
5	2,18	25	0,2492	218,70
6	2,24	25	0,2501	223,91
Média				218,57
Desvio padrão				3,58

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,42	25	0,2485	243,46
2	2,46	25	0,2482	247,78
3	2,45	25	0,2485	246,48
4	2,62	25	0,2506	261,37
5	2,61	25	0,2485	262,58
6	2,53	25	0,2481	254,94
Média				252,77
Desvio padrão				8,07

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,48	25	0,2481	249,90
2	2,35	25	0,2485	236,42
3	2,37	25	0,2486	238,33
4	2,43	25	0,2487	244,27
5	2,36	25	0,2480	237,90
6	2,46	25	0,2498	246,20
Média				242,17
Desvio padrão				5,41

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,66	25	0,2487	367,91
2	3,62	25	0,2482	364,63
3	3,63	25	0,2487	364,90
4	3,55	25	0,2482	357,57
5	3,67	25	0,2496	367,59
6	3,73	25	0,2484	375,40
Média				366,33
Desvio padrão				5,80

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	5,36	25	0,2497	536,64
2	5,42	25	0,2489	544,40
3	5,37	25	0,2475	542,42
4	5,46	25	0,2479	550,63
5	5,41	25	0,2485	544,27
6	5,50	25	0,2481	554,21
Média				545,43
Desvio padrão				6,21

Anexo B – 4
Teor de cromo na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,96	25	0,2497	396,48
2	4,00	25	0,2486	402,25
3	4,04	25	0,2486	406,28
4	3,99	25	0,2494	399,96
5	4,02	25	0,2486	404,26
6	4,04	25	0,2505	403,19
Média				402,07
Desvio padrão				3,45

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,41	25	0,2489	342,51
2	3,37	25	0,2473	340,68
3	3,28	25	0,2499	328,13
4	3,36	25	0,2488	337,62
5	3,32	25	0,2493	332,93
6	3,26	25	0,2508	324,96
Média				334,47
Desvio padrão				7,02

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,28	25	0,2475	230,30
2	2,26	25	0,2507	225,37
3	2,23	25	0,2480	224,80
4	2,33	25	0,2485	234,41
5	2,28	25	0,2484	229,47
6	2,31	25	0,2489	232,02
Média				229,39
Desvio padrão				3,75

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,34	25	0,2479	235,98
2	2,33	25	0,2493	233,65
3	2,36	25	0,2467	239,16
4	2,29	25	0,2494	229,55
5	2,31	25	0,2492	231,74
6	2,29	25	0,2501	228,91
Média				233,17
Desvio padrão				3,93

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,16	25	0,2485	317,91
2	3,13	25	0,2482	315,27
3	3,11	25	0,2485	312,88
4	3,10	25	0,2506	309,26
5	3,11	25	0,2485	312,88
6	3,09	25	0,2481	311,37
Média				313,26
Desvio padrão				3,02

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,14	25	0,2481	316,40
2	3,21	25	0,2485	322,94
3	3,12	25	0,2486	313,76
4	3,18	25	0,2487	319,66
5	3,12	25	0,2480	314,52
6	3,16	25	0,2498	316,25
Média				317,26
Desvio padrão				3,45

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,63	25	0,2487	364,90
2	3,51	25	0,2482	353,55
3	3,67	25	0,2487	368,92
4	3,66	25	0,2482	368,65
5	3,43	25	0,2496	343,55
6	3,43	25	0,2484	345,21
Média				357,46
Desvio padrão				11,58

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,52	25	0,2497	452,54
2	4,54	25	0,2489	456,01
3	4,48	25	0,2475	452,53
4	4,51	25	0,2479	454,82
5	4,53	25	0,2485	455,73
6	4,47	25	0,2481	450,42
Média				453,68
Desvio padrão				2,20

Anexo B – 5
Teor de níquel na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,99	25	0,2497	99,12
2	0,96	25	0,2486	96,54
3	1,01	25	0,2486	101,57
4	0,89	25	0,2494	89,21
5	0,96	25	0,2486	96,54
6	0,94	25	0,2505	93,81
Média				96,13
Desvio padrão				4,29

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,93	25	0,2489	93,41
2	0,93	25	0,2473	94,02
3	0,95	25	0,2499	95,04
4	0,95	25	0,2488	95,46
5	0,97	25	0,2493	97,27
6	0,98	25	0,2508	97,69
Média				95,48
Desvio padrão				1,72

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,85	25	0,2475	85,86
2	0,86	25	0,2507	85,76
3	0,87	25	0,2480	87,70
4	0,83	25	0,2485	83,50
5	0,86	25	0,2484	86,55
6	0,85	25	0,2489	85,38
Média				85,79
Desvio padrão				1,39

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,89	25	0,2479	89,75
2	0,90	25	0,2493	90,25
3	0,90	25	0,2467	91,20
4	0,86	25	0,2494	86,21
5	0,85	25	0,2492	85,27
6	0,88	25	0,2501	87,96
Média				88,44
Desvio padrão				2,36

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,93	25	0,2485	93,56
2	0,94	25	0,2482	94,68
3	0,95	25	0,2485	95,57
4	1,01	25	0,2506	100,76
5	1,03	25	0,2485	103,62
6	1,02	25	0,2481	102,78
Média				98,50
Desvio padrão				4,41

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,88	25	0,2481	88,67
2	0,93	25	0,2485	93,56
3	0,87	25	0,2486	87,49
4	0,87	25	0,2487	87,45
5	0,87	25	0,2480	87,70
6	0,85	25	0,2498	85,07
Média				88,32
Desvio padrão				2,83

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,47	25	0,2487	248,29
2	2,45	25	0,2482	246,78
3	2,49	25	0,2487	250,30
4	2,44	25	0,2482	245,77
5	2,46	25	0,2496	246,39
6	2,48	25	0,2484	249,60
Média				247,86
Desvio padrão				1,84

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,09	25	0,2497	409,49
2	4,06	25	0,2489	407,79
3	4,02	25	0,2475	406,06
4	4,07	25	0,2479	410,45
5	4,05	25	0,2485	407,44
6	4,03	25	0,2481	406,09
Média				407,89
Desvio padrão				1,78

Anexo B – 6
Teor de zinco na porção sólida do lodo durante a segunda biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 19/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,14	25	25	0,2497	350,42
2	0,13	25	25	0,2486	326,83
3	0,14	25	25	0,2486	351,97
4	0,15	25	25	0,2494	375,90
5	0,13	25	25	0,2486	326,83
6	0,14	25	25	0,2505	349,30
Média					346,88
Desvio padrão					18,39

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 20/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,12	25	25	0,2489	301,33
2	0,13	25	25	0,2473	328,55
3	0,12	25	25	0,2499	300,12
4	0,13	25	25	0,2488	326,57
5	0,13	25	25	0,2493	325,91
6	0,12	25	25	0,2508	299,04
Média					313,59
Desvio padrão					14,75

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 21/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,11	25	25	0,2475	277,78
2	0,12	25	25	0,2507	299,16
3	0,11	25	25	0,2480	277,22
4	0,11	25	25	0,2485	276,66
5	0,12	25	25	0,2484	301,93
6	0,11	25	25	0,2489	276,22
Média					284,83
Desvio padrão					12,22

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 22/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,11	25	25	0,2479	277,33
2	0,10	25	25	0,2493	250,70
3	0,11	25	25	0,2467	278,68
4	0,10	25	25	0,2494	250,60
5	0,11	25	25	0,2492	275,88
6	0,10	25	25	0,2501	249,90
Média					263,85
Desvio padrão					14,76

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 23/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,11	25	25	0,2485	276,66
2	0,10	25	25	0,2482	251,81
3	0,12	25	25	0,2485	301,81
4	0,10	25	25	0,2506	249,40
5	0,12	25	25	0,2485	301,81
6	0,11	25	25	0,2481	277,11
Média					276,43
Desvio padrão					22,91

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 24/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,12	25	25	0,2481	302,30
2	0,11	25	25	0,2485	276,66
3	0,11	25	25	0,2486	276,55
4	0,12	25	25	0,2487	301,57
5	0,12	25	25	0,2480	302,42
6	0,12	25	25	0,2498	300,24
Média					293,29
Desvio padrão					12,95

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 25/09/01

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,20	25	25	0,2487	502,61
2	0,19	25	25	0,2482	478,44
3	0,21	25	25	0,2487	527,74
4	0,20	25	25	0,2482	503,63
5	0,18	25	25	0,2496	450,72
6	0,20	25	25	0,2484	503,22
Média					494,40
Desvio padrão					26,48

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,58	25	25	0,2497	1451,74
2	0,62	25	25	0,2489	1556,85
3	0,58	25	25	0,2475	1464,65
4	0,67	25	25	0,2479	1689,19
5	0,60	25	25	0,2485	1509,05
6	0,65	25	25	0,2481	1637,44
Média					1551,49
Desvio padrão					95,57

ANEXO C

Anexo C – 1
Teor de cádmio na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,057	25	0,2478	5,75
2	0,053	25	0,2496	5,31
3	0,050	25	0,2486	5,03
4	0,052	25	0,2522	5,15
5	0,056	25	0,2470	5,67
6	0,055	25	0,2459	5,59
Média				5,42
Desvio padrão				0,30

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,046	25	0,2509	4,58
2	0,049	25	0,2476	4,95
3	0,048	25	0,2446	4,91
4	0,049	25	0,2472	4,96
5	0,048	25	0,2476	4,85
6	0,047	25	0,2469	4,76
Média				4,83
Desvio padrão				0,14

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo – 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,047	25	0,2469	4,76
2	0,045	25	0,2501	4,50
3	0,046	25	0,2481	4,64
4	0,047	25	0,2493	4,71
5	0,046	25	0,2449	4,70
6	0,047	25	0,2476	4,75
Média				4,67
Desvio padrão				0,10

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo – 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,055	25	0,2476	5,55
2	0,054	25	0,2476	5,45
3	0,059	25	0,2479	5,95
4	0,058	25	0,2485	5,84
5	0,054	25	0,2497	5,41
6	0,056	25	0,2474	5,66
Média				5,64
Desvio padrão				0,22

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,068	25	0,2489	6,83
2	0,066	25	0,2475	6,67
3	0,065	25	0,2454	6,62
4	0,068	25	0,2497	6,81
5	0,065	25	0,2485	6,54
6	0,065	25	0,2508	6,48
Média				6,66
Desvio padrão				0,14

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,072	25	0,2463	7,31
2	0,070	25	0,2468	7,09
3	0,071	25	0,2467	7,19
4	0,071	25	0,2464	7,20
5	0,071	25	0,2501	7,10
6	0,075	25	0,2465	7,61
Média				7,25
Desvio padrão				0,19

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,075	25	0,2500	7,50
2	0,071	25	0,2490	7,13
3	0,072	25	0,2507	7,18
4	0,078	25	0,2468	7,90
5	0,075	25	0,2493	7,52
6	0,080	25	0,2502	7,99
Média				7,54
Desvio padrão				0,36

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,119	25	0,2504	11,88
2	0,126	25	0,2484	12,68
3	0,130	25	0,2485	13,08
4	0,129	25	0,2471	13,05
5	0,127	25	0,2497	12,72
6	0,128	25	0,2494	12,83
Média				12,71
Desvio padrão				0,44

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,139	25	0,2501	13,89
2	0,141	25	0,2480	14,21
3	0,145	25	0,2509	14,45
4	0,148	25	0,2471	14,97
5	0,144	25	0,2497	14,42
6	0,146	25	0,2494	14,64
Média				14,43
Desvio padrão				0,37

Anexo C – 2
Teor de chumbo na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,83	25	0,2478	184,62
2	1,89	25	0,2496	189,30
3	1,81	25	0,2486	182,02
4	1,78	25	0,2522	176,45
5	1,79	25	0,2470	181,17
6	1,77	25	0,2459	179,95
Média				182,25
Desvio padrão				4,37

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,60	25	0,2509	159,43
2	1,56	25	0,2476	157,51
3	1,44	25	0,2446	147,18
4	1,61	25	0,2472	162,82
5	1,56	25	0,2476	157,51
6	1,67	25	0,2469	169,10
Média				158,92
Desvio padrão				7,22

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,26	25	0,2469	127,58
2	1,47	25	0,2501	146,94
3	1,33	25	0,2481	134,02
4	1,33	25	0,2493	133,37
5	1,27	25	0,2449	129,64
6	1,23	25	0,2476	124,19
Média				132,63
Desvio padrão				7,91

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,37	25	0,2476	138,33
2	1,48	25	0,2476	149,43
3	1,54	25	0,2479	155,30
4	1,63	25	0,2485	163,98
5	1,55	25	0,2497	155,19
6	1,49	25	0,2474	150,57
Média				152,13
Desvio padrão				8,49

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,92	25	0,2489	192,85
2	1,87	25	0,2475	188,89
3	1,99	25	0,2454	202,73
4	1,87	25	0,2497	187,22
5	1,88	25	0,2485	189,13
6	1,84	25	0,2508	183,41
Média				190,71
Desvio padrão				6,64

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,96	25	0,2463	198,94
2	2,02	25	0,2468	204,62
3	2,02	25	0,2467	204,70
4	1,82	25	0,2464	184,66
5	1,98	25	0,2501	197,92
6	1,96	25	0,2465	198,78
Média				198,27
Desvio padrão				7,32

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,43	25	0,2500	143,00
2	1,56	25	0,2490	156,63
3	1,55	25	0,2507	154,57
4	1,48	25	0,2468	149,92
5	1,60	25	0,2493	160,45
6	1,55	25	0,2502	154,88
Média				153,24
Desvio padrão				6,06

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,90	25	0,2504	189,70
2	1,89	25	0,2484	190,22
3	1,87	25	0,2485	188,13
4	1,89	25	0,2471	191,22
5	1,97	25	0,2497	197,24
6	2,03	25	0,2494	203,49
Média				193,33
Desvio padrão				5,88

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,36	25	0,2501	335,87
2	3,27	25	0,2480	329,64
3	3,32	25	0,2509	330,81
4	3,25	25	0,2471	328,81
5	3,26	25	0,2497	326,39
6	3,28	25	0,2494	328,79
Média				330,05
Desvio padrão				3,20

Anexo C – 3
Teor de cobre na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,71	25	0,2478	172,52
2	1,78	25	0,2496	178,29
3	1,73	25	0,2486	173,97
4	1,76	25	0,2522	174,46
5	1,77	25	0,2470	179,15
6	1,67	25	0,2459	169,78
Média				174,70
Desvio padrão				3,53

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,71	25	0,2509	170,39
2	1,78	25	0,2476	179,73
3	1,62	25	0,2446	165,58
4	1,74	25	0,2472	175,97
5	1,69	25	0,2476	170,64
6	1,71	25	0,2469	173,15
Média				172,57
Desvio padrão				4,91

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,66	25	0,2469	168,08
2	1,65	25	0,2501	164,93
3	1,67	25	0,2481	168,28
4	1,56	25	0,2493	156,44
5	1,54	25	0,2449	157,21
6	1,56	25	0,2476	157,51
Média				162,08
Desvio padrão				5,64

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,43	25	0,2476	144,39
2	1,55	25	0,2476	156,50
3	1,53	25	0,2479	154,30
4	1,49	25	0,2485	149,90
5	1,54	25	0,2497	154,19
6	1,55	25	0,2474	156,63
Média				152,65
Desvio padrão				4,72

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,58	25	0,2489	158,70
2	1,56	25	0,2475	157,58
3	1,59	25	0,2454	161,98
4	1,54	25	0,2497	154,19
5	1,64	25	0,2485	164,99
6	1,55	25	0,2508	154,51
Média				158,66
Desvio padrão				4,23

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,62	25	0,2463	164,43
2	1,56	25	0,2468	158,02
3	1,64	25	0,2467	166,19
4	1,57	25	0,2464	159,29
5	1,59	25	0,2501	158,94
6	1,59	25	0,2465	161,26
Média				161,36
Desvio padrão				3,29

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	1,64	25	0,2500	164,00
2	1,65	25	0,2490	165,66
3	1,67	25	0,2507	166,53
4	1,65	25	0,2468	167,14
5	1,62	25	0,2493	162,45
6	1,63	25	0,2502	162,87
Média				164,78
Desvio padrão				1,95

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	5,22	25	0,2504	521,17
2	5,27	25	0,2484	530,39
3	5,15	25	0,2485	518,11
4	5,29	25	0,2471	535,21
5	5,24	25	0,2497	524,63
6	5,14	25	0,2494	515,24
Média				524,12
Desvio padrão				7,57

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	5,83	25	0,2501	582,77
2	5,94	25	0,2480	598,79
3	6,00	25	0,2509	597,85
4	5,85	25	0,2471	591,87
5	5,93	25	0,2497	593,71
6	5,97	25	0,2494	598,44
Média				593,90
Desvio padrão				6,14

Anexo C – 4
Teor de cromo na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,70	25	0,2478	474,17
2	4,67	25	0,2496	467,75
3	4,69	25	0,2486	471,64
4	4,65	25	0,2522	460,94
5	4,67	25	0,2470	472,67
6	4,64	25	0,2459	471,74
Média				469,82
Desvio padrão				4,84

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,45	25	0,2509	443,40
2	4,46	25	0,2476	450,32
3	4,44	25	0,2446	453,80
4	4,41	25	0,2472	446,00
5	4,40	25	0,2476	444,26
6	4,42	25	0,2469	447,55
Média				447,56
Desvio padrão				3,93

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,89	25	0,2469	393,88
2	3,96	25	0,2501	395,84
3	3,97	25	0,2481	400,04
4	3,97	25	0,2493	398,11
5	3,93	25	0,2449	401,18
6	3,94	25	0,2476	397,82
Média				397,81
Desvio padrão				2,67

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,38	25	0,2476	442,25
2	4,30	25	0,2476	434,17
3	4,37	25	0,2479	440,70
4	4,27	25	0,2485	429,58
5	4,18	25	0,2497	418,50
6	4,21	25	0,2474	425,42
Média				431,77
Desvio padrão				9,13

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,33	25	0,2489	434,91
2	4,37	25	0,2475	441,41
3	4,31	25	0,2454	439,08
4	4,41	25	0,2497	441,53
5	4,38	25	0,2485	440,64
6	4,42	25	0,2508	440,59
Média				439,70
Desvio padrão				2,50

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,46	25	0,2463	452,70
2	4,40	25	0,2468	445,71
3	4,50	25	0,2467	456,02
4	4,38	25	0,2464	444,40
5	4,41	25	0,2501	440,82
6	4,39	25	0,2465	445,23
Média				447,48
Desvio padrão				5,70

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,39	25	0,2500	439,00
2	4,35	25	0,2490	436,75
3	4,4	25	0,2507	438,77
4	4,46	25	0,2468	451,78
5	4,45	25	0,2493	446,25
6	4,47	25	0,2502	446,64
Média				443,20
Desvio padrão				5,89

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	4,55	25	0,2504	454,27
2	4,57	25	0,2484	459,94
3	4,58	25	0,2485	460,76
4	4,59	25	0,2471	464,39
5	4,55	25	0,2497	455,55
6	4,61	25	0,2494	462,11
Média				459,50
Desvio padrão				3,88

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	6,36	25	0,2501	635,75
2	6,27	25	0,2480	632,06
3	6,32	25	0,2509	629,73
4	6,25	25	0,2471	632,34
5	6,26	25	0,2497	626,75
6	6,28	25	0,2494	629,51
Média				631,02
Desvio padrão				3,08

Anexo C – 5
Teor de níquel na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,81	25	0,2478	81,72
2	0,82	25	0,2496	82,13
3	0,83	25	0,2486	83,47
4	0,84	25	0,2522	83,27
5	0,77	25	0,2470	77,94
6	0,78	25	0,2459	79,30
Média				81,30
Desvio padrão				2,23

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,76	25	0,2509	75,73
2	0,79	25	0,2476	79,77
3	0,77	25	0,2446	78,70
4	0,76	25	0,2472	76,86
5	0,72	25	0,2476	72,70
6	0,76	25	0,2469	76,95
Média				76,78
Desvio padrão				2,47

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,72	25	0,2469	72,90
2	0,71	25	0,2501	70,97
3	0,74	25	0,2481	74,57
4	0,72	25	0,2493	72,20
5	0,69	25	0,2449	70,44
6	0,75	25	0,2476	75,73
Média				72,80
Desvio padrão				2,05

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,77	25	0,2476	77,75
2	0,80	25	0,2476	80,78
3	0,78	25	0,2479	78,66
4	0,74	25	0,2485	74,45
5	0,81	25	0,2497	81,10
6	0,80	25	0,2474	80,84
Média				78,93
Desvio padrão				2,58

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,77	25	0,2489	77,34
2	0,78	25	0,2475	78,79
3	0,79	25	0,2454	80,48
4	0,82	25	0,2497	82,10
5	0,83	25	0,2485	83,50
6	0,76	25	0,2508	75,76
Média				79,66
Desvio padrão				2,92

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,75	25	0,2463	76,13
2	0,75	25	0,2468	75,97
3	0,76	25	0,2467	77,02
4	0,73	25	0,2464	74,07
5	0,74	25	0,2501	73,97
6	0,78	25	0,2465	79,11
Média				76,04
Desvio padrão				1,93

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,76	25	0,2500	76,00
2	0,82	25	0,2490	82,33
3	0,80	25	0,2507	79,78
4	0,77	25	0,2468	78,00
5	0,81	25	0,2493	81,23
6	0,78	25	0,2502	77,94
Média				79,21
Desvio padrão				2,35

Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação- 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	2,05	25	0,2504	204,67
2	2,04	25	0,2484	205,31
3	2,03	25	0,2485	204,23
4	2,00	25	0,2471	202,35
5	2,02	25	0,2497	202,24
6	1,97	25	0,2494	197,47
Média				202,71
Desvio padrão				2,85

Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	3,33	25	0,2501	332,87
2	3,39	25	0,2480	341,73
3	3,40	25	0,2509	338,78
4	3,37	25	0,2471	340,96
5	3,38	25	0,2497	338,41
6	3,36	25	0,2494	336,81
Média				338,26
Desvio padrão				3,19

Anexo C – 6
Teor de zinco na porção sólida do lodo durante a terceira biolixiviação

Porção sólida do lodo com 6 dias de processo - 30/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,13	25	25	0,2478	327,89
2	0,13	25	25	0,2496	325,52
3	0,14	25	25	0,2486	351,97
4	0,13	25	25	0,2522	322,16
5	0,12	25	25	0,247	303,64
6	0,13	25	25	0,2459	330,42
Média					326,93
Desvio padrão					15,54

Porção sólida do lodo com 7 dias de processo - 31/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,14	25	25	0,2509	348,74
2	0,12	25	25	0,2476	302,91
3	0,12	25	25	0,2446	306,62
4	0,13	25	25	0,2472	328,68
5	0,13	25	25	0,2476	328,15
6	0,12	25	25	0,2469	303,77
Média					319,81
Desvio padrão					18,45

Porção sólida do lodo com 8 dias de processo - 01/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,13	25	25	0,2469	329,08
2	0,12	25	25	0,2501	299,88
3	0,11	25	25	0,2481	277,11
4	0,12	25	25	0,2493	300,84
5	0,13	25	25	0,2449	331,77
6	0,12	25	25	0,2476	302,91
Média					306,93
Desvio padrão					20,49

Porção sólida do lodo com 9 dias de processo - 02/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,14	25	25	0,2476	353,39
2	0,13	25	25	0,2476	328,15
3	0,13	25	25	0,2479	327,75
4	0,13	25	25	0,2485	326,96
5	0,13	25	25	0,2497	325,39
6	0,14	25	25	0,2474	353,68
Média					335,89
Desvio padrão					13,70

Porção sólida do lodo com 10 dias de processo - 03/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,13	25	25	0,2489	326,44
2	0,13	25	25	0,2475	328,28
3	0,14	25	25	0,2454	356,56
4	0,14	25	25	0,2497	350,42
5	0,13	25	25	0,2485	326,96
6	0,14	25	25	0,2508	348,88
Média					337,73
Desvio padrão					13,80

Porção sólida do lodo com 11 dias de processo - 04/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,14	25	25	0,2463	355,26
2	0,13	25	25	0,2468	329,21
3	0,13	25	25	0,2467	329,35
4	0,12	25	25	0,2464	304,38
5	0,14	25	25	0,2501	349,86
6	0,13	25	25	0,2465	329,61
Média					332,95
Desvio padrão					18,10

Porção sólida do lodo com 12 dias de processo - 05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,14	25	25	0,2500	350,00
2	0,15	25	25	0,2490	376,51
3	0,13	25	25	0,2507	324,09
4	0,13	25	25	0,2468	329,21
5	0,14	25	25	0,2493	350,98
6	0,14	25	25	0,2502	349,72
Média					346,75
Desvio padrão					18,67

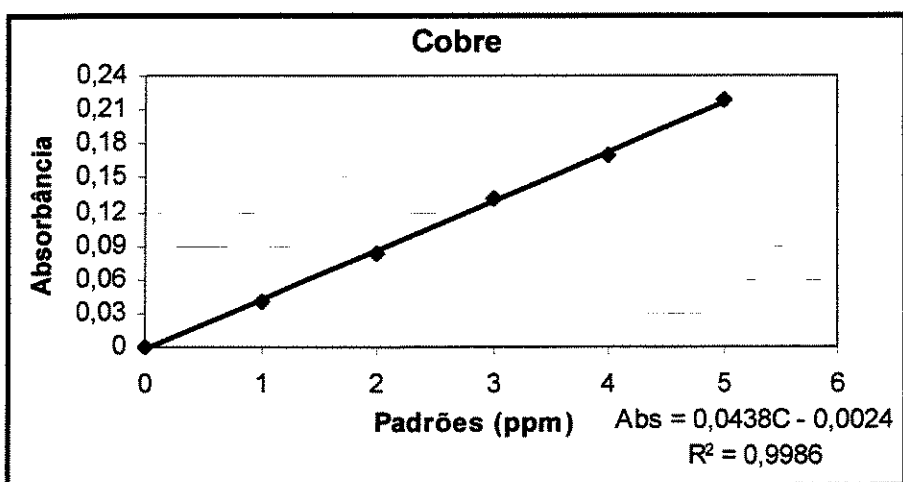
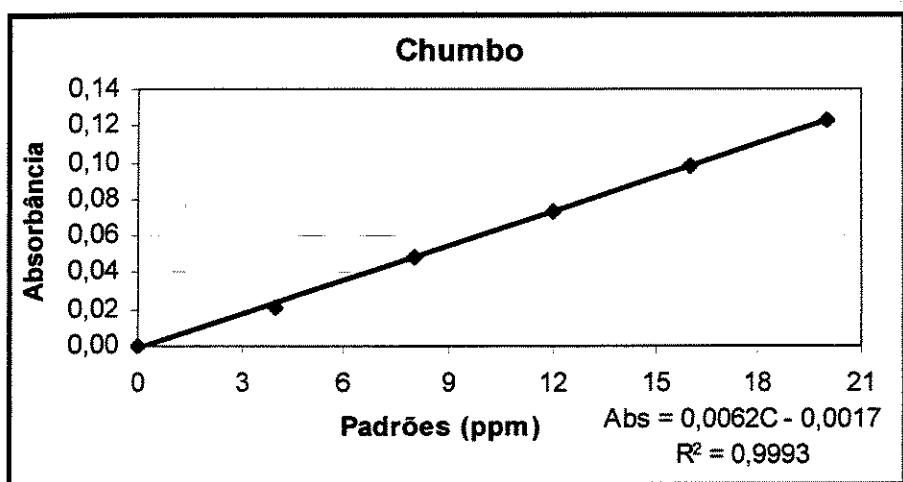
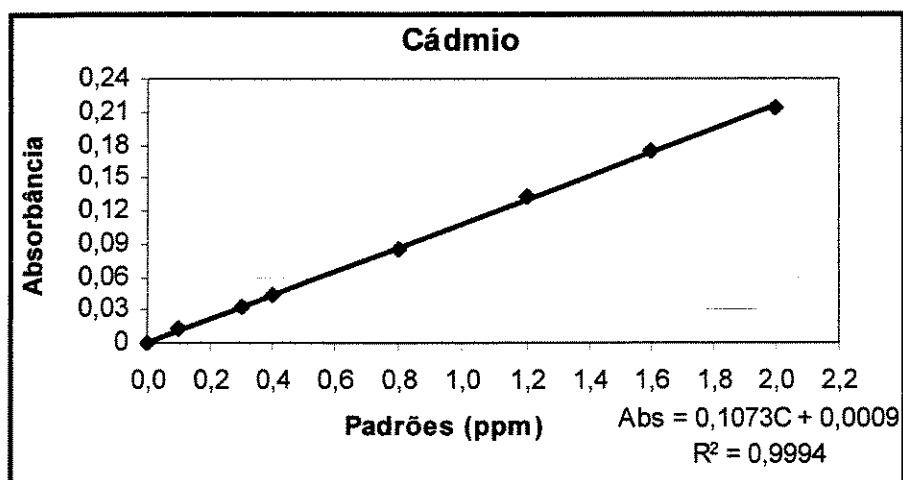
Porção sólida do lodo bruto (controle) após 12 dias de biolixiviação-05/02/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,52	25	25	0,2504	1297,92
2	0,52	25	25	0,2484	1308,37
3	0,53	25	25	0,2485	1333,00
4	0,55	25	25	0,2471	1391,14
5	0,53	25	25	0,2497	1326,59
6	0,55	25	25	0,2494	1378,31
Média					1339,22
Desvio padrão					37,63

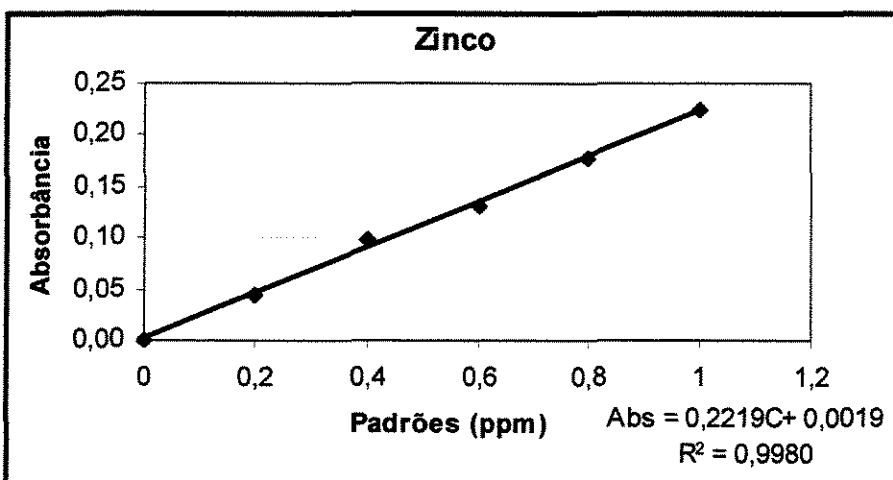
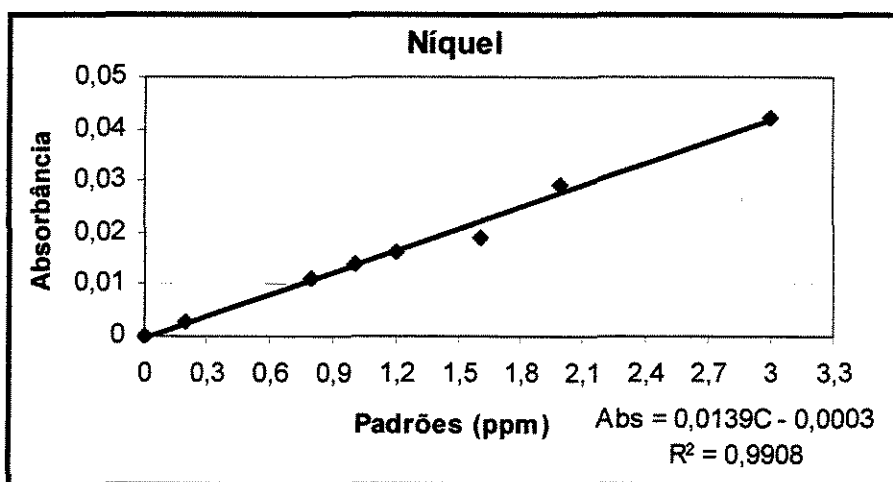
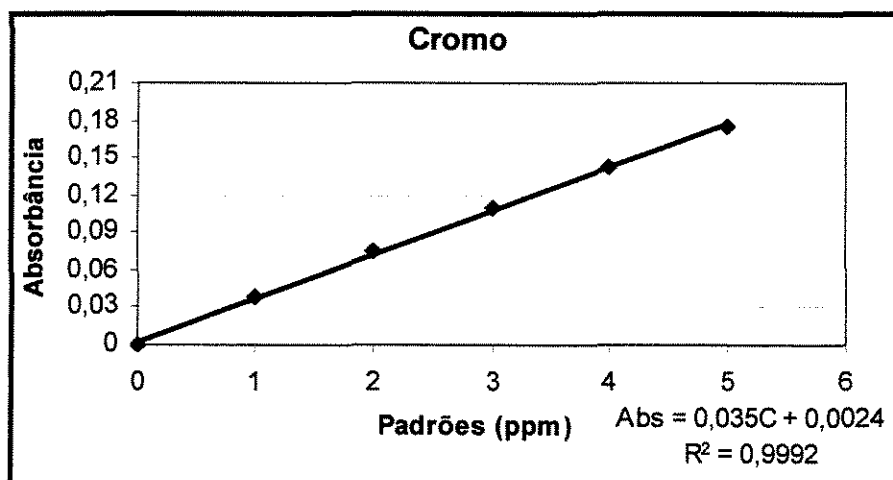
Porção sólida do lodo bruto antes da biolixiviação - 24/01/02

Subamostra	Concentração (mg/L)	Volume (mL)	Diluição	Peso (g)	Concentração final (ppm)
1	0,98	25	25	0,2501	2449,02
2	0,98	25	25	0,2480	2469,76
3	0,95	25	25	0,2509	2366,48
4	0,97	25	25	0,2471	2453,46
5	0,96	25	25	0,2497	2402,88
6	0,99	25	25	0,2494	2480,95
Média					2437,09
Desvio padrão					43,72

ANEXO D



Anexo D – Curva de calibração do cádmio, chumbo e cobre



Anexo D – Curva de calibração do cromo, níquel e zinco