

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO**

**ESTUDO DA ABSORÇÃO DE METAIS EM CULTURA DE
MILHO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO
DOMÉSTICO EMPREGANDO A REFLEXÃO TOTAL
COM RADIAÇÃO SÍNCROTON (SR-TXRF)**

CLÁUDIA BRASIL VIEIRA

Campinas, SP

2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

ESTUDO DA ABSORÇÃO DE METAIS EM CULTURA DE
MILHO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO
DOMÉSTICO EMPREGANDO A REFLEXÃO TOTAL
COM RADIAÇÃO SÍNCROTON (SR-TXRF)

CLÁUDIA BRASIL VIEIRA

Orientadora: SILVANA MOREIRA

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Atesto que essa é a versão definitiva da
dissertação/tese
Prof. Dr. *Silvana Moreira*
Matricula 94874 - 04/11/04

Campinas, SP
2004

NIDADE	BC
CHAMADA	I/UNICAMP
	V673e
	EX
OMBO BC/	61954
ROC.	16-86-05
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
REÇO	21.00
DATA	4-7-05
1º CPD	

Bibid 335959

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

V676e
3

Vieira, Cláudia Brasil

Estudo da absorção de metais em cultura de milho irrigado com efluente de esgoto doméstico empregado a reflexão total com radiação síncroton (SR-TXRF) / Cláudia Brasil Vieira. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Silvana Moreira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

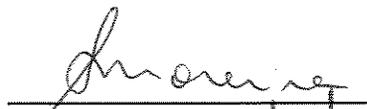
1. Plantas Efeitos dos metais pesados. 2. Esgotos. 3. Absorção. 4. Águas residuais de irrigação. 5. Fluorescência de Raio X. I. Moreira, Silvana. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

ESTUDO DA ABSORÇÃO DE METAIS EM CULTURA DE MILHO
IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO EMPREGANDO
A REFLEXÃO TOTAL
COM RADIAÇÃO SÍNCROTON (SR-TXRF)

CLÁUDIA BRASIL VIEIRA

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



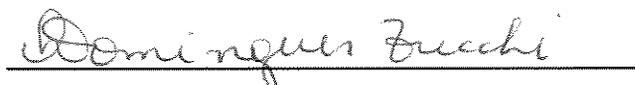
Profa. Dra. Silvana Moreira

Presidente e Orientadora – FEC/UNICAMP



Prof. Dr. Edevar Luvizotto Junior

FEC/UNICAMP



Profa. Dra. Orghêda Luiza Domingues Zucchi

FCFRP/USP

12/05/00 019

“Tu que estás sob a proteção do altíssimo e moras à sombra do Onipotente, dize ao Senhor: “Meu refúgio, minha fortaleza, meu Deus, em quem confio””.

(Salmo 91, 1-2)

à minha filha Marina, aos meus pais, Rose e Dirceu, e a Vanessa, porque, simplesmente, sem vocês nada disso seria possível, amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A Prof^a. Dr^a. Silvana Moreira, que abriu as portas, para que esse sonho se realizasse. Obrigado pelo exemplo e incentivo, pela força e apoio, pela oportunidade, credibilidade e amizade. “Ninguém doa nada que não lhe tenha sido dado para doar” – Luiz Vicente de Souza Queiroz, 1892.

Ao Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho, pela amizade e oportunidade de desenvolver esse trabalho junto às pesquisas da área de Saneamento. Por toda estrutura fornecida, pela disponibilidade e ensinamento.

À Prof^a Dr^a. Orghêda Luiza Araújo Domingues Zucchi pela disponibilidade e conhecimentos nas análises estatísticas dos resultados.

Ao Dr. Ronaldo Stefanutti, pelo apoio, atenção, disponibilidades, incentivo e discussões enriquecedoras.

Às Dras. Ana Paula Packer e Cristiane Tumang, pela dedicação nos preparos das amostras, pelos ensinamentos, pelo incentivo, pelas discussões e pelo exemplo.

A tecnóloga Silvana Broleze, aos bolsistas Andréia, Bianca, Ronei, Elizete, Janaína, Tássia, Tatila, Ronei e Elgim (*in memorian*) pelo apoio em laboratório e campo.

Aos colegas de pós-graduação Marcelo, Lubiesnka, Rita, Luciana, Renato, Maria, Rogério, Elder, Neusa, Adriano, e tantos outros, pelo companheirismo e amizade ao longo desta jornada.

Aos funcionários do Laboratório de Hidrologia, Laboratório de Mecânica dos Solos e Estradas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, pelo apoio e, disponibilidade apresentada quando solicitados.

Ao departamento de estatística da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, pelas portas abertas, atenção e disponibilidade.

Ao LNLS, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, por ter aberto as portas e cedido espaço para análises das amostras da cultura de milho por SR-TXRF, projeto número D09B-XRF-1078.

Aos funcionários do CESET/UNICAMP e à direção pela disponibilidade de espaço e instrumentação necessários para a realização das atividades.

À FINEP, ao BID, ao CNPq e à Caixa Econômica Federal que financiaram o PROSAB-Edital 3, do qual fez parte esse projeto.

À Cia Águas de Limeira por ter aberto as portas e cedido o espaço necessário para o desenvolvimento da parte de campo.

Ao amigo de experimento Ricardo, sem o qual o experimento não teria sido realizado.

À Mariana e Michele, funcionárias da Secretaria de Agricultura, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, da Prefeitura Municipal de Limeira.

À Lívia Bacan Cortez pela disponibilidade, amizade e atenção.

À todos aqueles que direta ou indiretamente participaram da realização desse trabalho e desse momento da minha vida.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xx
RESUMO.....	xxv
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1. REATORES ANAERÓBIOS UASB.....	19
3.2. DISPOSIÇÃO DO ESGOTO NO SOLO.....	21
3.3. IRRIGAÇÃO.....	25
3.3.1. Condições Básicas para uma Irrigação Eficiente.....	26
3.3.1.1 Aplicação da Quantidade de Água Necessária.....	26
3.3.1.2 Qualidade da Água Aplicada.....	27

3.3.1.3	Frequência de Irrigação.....	27
3.3.1.4	Técnicas de Irrigação.....	29
3.3.1.5	Lixiviação.....	30
3.3.1.6	Drenagem.....	30
3.3.2.	Ciclo Vegetativo das Plantas.....	31
3.3.2.1	Estágio Inicial.....	32
3.3.2.2	Estágio de Desenvolvimento.....	32
3.3.2.3	Estágio Intermediário.....	32
3.3.2.4	Estágio de Maturação.....	33
3.3.2.5	Estágio Final.....	33
3.4.	FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	34
4.	MATERIAL E MÉTODO.....	43
4.1.	LOCAL DO EXPERIMENTO.....	43
4.2.	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO.....	43
4.3.	IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA.....	46
4.3.1.	Ensaio Preliminares.....	46
4.3.2.	Preparo do Solo.....	47
4.3.3.	Estrutura do Projeto.....	47
4.3.4.	Plantio.....	53
4.4.	OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	54
4.4.1.	Controle de Irrigação.....	54
4.4.1.1.	Método Gravimétrico.....	54
4.4.1.2.	Método do Tanque Classe A – Controle diário.....	55
4.4.2.	Lâmina Hídrica e Volume de Irrigação.....	56
4.5.	ANÁLISE AGRONÔMICA.....	57
4.5.1	Produtividade Agrícola.....	57
4.6.	ANÁLISE DE METAIS.....	58

4.6.1. Preparação das Amostras e Padrões.....	58
4.6.2. Instrumentação.....	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
5.1. LEVANTAMENTO PRELIMINAR E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA.....	63
5.1.1. Densidade Global.....	63
5.1.2. Curva Característica do Solo.....	63
5.1.3. Ensaio de Granulometria.....	64
5.1.4. Ensaio de Fertilidade.....	65
5.1.5. Volume Aplicado.....	65
5.2. OPERAÇÃO DO SISTEMA.....	66
5.3. ANÁLISE AGRONÔMICA.....	67
5.4. ANÁLISE QUANTITATIVA DO ESGOTO BRUTO.....	72
5.5. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA E LIMITE DE DETECÇÃO POR SR-TXRF.....	72
5.6. ANÁLISE QUANTITATIVA DAS FOLHAS E ESPIGAS DE MILHO IRRIGADO COM EFLUENTE E ÁGUA.....	76
5.7. ANÁLISE FATORIAL.....	88
6. CONCLUSÕES.....	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93
8. ABSTRACT.....	101

ANEXOS	103
Anexo A – Localização.....	105
Anexo B – Dados do Projeto de Irrigação.....	113
Anexo C – Limites de Tolerância e Danos à Saúde.....	133

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 3.1 - Áreas irrigadas com águas residuárias em diferentes países.....	16
Tabela 3.2 - Diretrizes recomendadas pela OMS para a qualidade das águas residuárias utilizadas na agricultura.....	17
Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens do processo anaeróbio.....	20
Tabela 3.4 - Qualidade esperada do efluente tratado por aplicação no solo.....	24
Tabela 3.5 - Alguns parâmetros exigidos para a qualidade da água na irrigação.....	27
Tabela 3.6 - Fatores que afetam a seleção de técnica de irrigação e medidas necessárias quando se utilizam águas residuárias.....	31
Tabela 5.1 - Densidade Global do solo nas profundidades de 0-25, 25-50, 50-75 e 75-100 cm.....	64
Tabela 5.2 - Dados de Capacidade de Campo (CC) etapas de irrigação, Umidade Crítica (UC) e Ponto de Murchamento (PM) do solo extraídos das curvas características correspondentes.....	64
Tabela 5.3 - Ensaio de fertilidade para o solo natural.....	65
Tabela 5.4 - Cálculo dos parâmetros de projeto do sistema de irrigação para as profundidades de irrigação estabelecidas (20 cm, 40 cm e 60 cm).....	65

Tabela 5.5 - Volume aplicado por sulco para as três profundidades de irrigação.....	66
Tabela 5.6 - Dias de mudança de estágio do ciclo vegetativo do milho.....	66
Tabela 5.7 - Concentração dos elementos nas soluções padrão, empregados para a calibração das linhas da série K.....	74
Tabela 5.8 - Concentração dos elementos nas soluções padrão, empregados para a calibração das linhas da série L.....	74
Tabela 5.9 - Dados empregados para análise de <i>cluster</i>.....	88
Tabela B.1 - Apresentação dos dias de irrigação, de precipitação, das lâminas hídricas aplicadas e do volume aplicado na safra.....	131
Tabela C.1 - Limites Máximos de Tolerância (ANVISA, 1965).....	135
Tabela C.2 - Efeitos causados à saúde pelos metais (CETESB, 2001).....	137

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 - Configuração de um reator manta de lodo (UASB).....	20
Figura 3.2 - Configuração do Método de Escoamento Superficial.....	24
Figura 3.3 - Configuração do Método de Infiltração-Percolação.....	25
Figura 3.4 - Ilustração do controle de irrigação, havendo uma irrigação antecipada que teve como consequência a provável lixiviação do líquido.....	28
Figura 3.5 - Algumas técnicas de irrigação mais utilizadas para tratamento das águas residuárias.....	29
Figura 3.6 - Relação do coeficiente de demanda hídrica do milho (kc) com os dias de duração do ciclo vegetativo.....	34
Figura 4.1 - Área do projeto.....	44
Figura 4.2 - Entrada do ETE da Graminha.....	44
Figura 4.3 - Terreno adjacente à ETE Graminha, Limeira, SP, onde foi instalado o sistema de irrigação (solo natural).....	45
Figura 4.4 - Filtros Anaeróbios instalados no interior das dependências da ETE Graminha, Cia Águas de Limeira-SA, Limeira, SP.....	45
Figura 4.5 - Aspecto do solo após aração e gradeamento.....	49
Figura 4.6 - Aplicação de calcário agrícola na área experimental.....	49

Figura 4.7 - Implantação de um cenário.....	50
Figura 4.8 - Esquema de um cenário, com identificação das linhas de bordadura e da seção dos sulcos.....	50
Figura 4.9 - Esquema do projeto com cada bloco e seus respectivos cenários, com o tipo de tratamento, irrigação com água e efluente, e os diferentes volumes de aplicação.....	51
Figura 4.10 - Bloco implantado na área experimental.....	51
Figura 4.11 - Sistema de distribuição do efluente e da água instalado na área experimental.....	52
Figura 4.12 - Aplicação do sistema de irrigação por sulcos.....	52
Figura 4.13 - Plantio de milho, realizado com matraca, ao longo dos cenários.....	53
Figura 4.14 - Ilustração da área de influência de um sulco de infiltração no cenário.....	57
Figura 4.15 - Esquema simplificado da TXRF com excitação por radiação síncroton.....	61
Figura 4.16 - Fotografia do sistema de excitação/deteccção da linha de Fluorescência de Raios X do Laboratório Nacional de Luz Síncroton.....	61
Figura 5.1 - Desempenho do milho irrigado e não irrigado, no centro da figura, o bom desempenho da cultura irrigada com efluente.....	68
Figura 5.2 - Aspecto do milho irrigado nas taxas de 20 cm, 40 cm e 60 cm de profundidade de irrigação.....	68
Figura 5.3 - Produção da biomassa medida através da massa seca (Kg.ha⁻¹) de espiga e grãos.....	69
Figura 5.4 - Altura média dos pés de milho e inserção da espiga.....	69
Figura 5.5 - Número de espigas por pé de milho.....	70

Figura 5.6 -	Concentrações de K, P, Mg, S e Ca, em g.Kg⁻¹ (A) translocadas para os grãos de milho.....	71
Figura 5.7 -	Concentrações de Na, Zn e Cu, em mg.Kg⁻¹ (B) translocadas para os grãos de milho.....	71
Figura 5.8 -	Concentração de nutrientes (Na, P, K, Mg, Ca eS) presentes no esgoto bruto coletado ao longo de 4 semanas.....	73
Figura 5.9 -	Concentração de metais (Cu, Ni e Zn) presentes no esgoto bruto coletado ao longo de 4 semanas.....	73
Figura 5.10 -	Curva da sensibilidade relativa para os elementos da série K por SR-TXRF.....	75
Figura 5.11 -	Curva da sensibilidade relativa para os elementos da série L por SR-TXRF.....	75
Figura 5.12 -	Curva do limite de detecção para os elementos da série K por SR-TXRF.....	76
Figura 5.13 -	Concentrações médias de Si nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	77
Figura 5.14 -	Concentrações médias de P nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	77
Figura 5.15 -	Concentrações médias de S nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	78
Figura 5.16 -	Concentrações médias de K nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	78

Figura 5.17 - Concentrações médias de Ca nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	79
Figura 5.18 - Concentrações médias de Ti nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	79
Figura 5.19 - Concentrações médias de Cr nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	80
Figura 5.20 - Concentrações médias de Mn nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	80
Figura 5.21 - Concentrações médias de Fe nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	81
Figura 5.22 - Concentrações médias de Ni nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	81
Figura 5.23 - Concentrações médias de Cu nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	82
Figura 5.24 - Concentrações médias de Zn nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	82
Figura 5.25 - Concentrações médias de Rb nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	83

Figura 5.26 - Concentrações médias de Sr nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	83
Figura 5.27 - Concentrações médias de Ba nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	84
Figura 5.28 - Concentrações médias de Pb nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.....	84
Figura 5.29 - Espectro dos raios X característicos de uma amostra de folha irrigada com 120 L de efluente.....	87
Figura 5.30 - Dendograma para as folhas e espigas de milho irrigado com efluente e água com volumes de aplicação de 60, 120 e 180 L.....	89
Figura A.1 - Mapa do Ribeirão da Graminha que pertence a Bacia do Piracicaba.....	107
Figura A.2 - Levantamento topográfico da área experimental.....	109
Figura A.3 - Indicação do escoamento do lençol freático.....	111
Figura B.1 - Curva característica da água do solo, para a camada de 0-25 cm, referente ao solo natural.....	115
Figura B.2 - Curva característica da água do solo, para a camada de 25-50 cm, referente ao solo natural.....	117
Figura B.3 - Curva característica da água do solo, para a camada de 50-75 cm, referente ao solo natural.....	119
Figura B.4 - Curva característica da água do solo, para a camada de 75-100 cm, referente ao solo natural.....	121
Figura B.5 - Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 0-25 cm.....	123

Figura B.6 - Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 25-50 cm.....	125
Figura B.7 - Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 50-75 cm.....	127
Figura B.8 - Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 0-25 cm, referente ao solo natural.....	129

LISTA DE EQUAÇÕES

	Página
Equação 3.1 - Equação básica para análise quantitativa.....	38
Equação 3.2 - Relação entre a intensidade do elemento <i>i</i> na amostra e a intensidade do padrão interno na amostra.....	39
Equação 3.3 - Equação da contagem relativa.....	39
Equação 3.4 - Equação da contagem relativa.....	39
Equação 3.5 - Equação da contagem relativa para o elemento <i>i</i> na amostra.....	39
Equação 3.6 - Equação da concentração do elemento <i>i</i>	40
Equação 3.7 - Equação do limite máximo de detecção do elemento <i>i</i> em cps.....	41
Equação 3.8 - Equação do limite de detecção do elemento <i>i</i> em ppm.....	41
Equação 4.1 - Equação da densidade global do solo.....	46
Equação 4.2 - Equação da umidade atual.....	54
Equação 4.3 - Equação da lâmina hídrica líquida.....	56
Equação 4.4 - Equação do volume aplicado.....	56
Equação 4.5 - Equação do cálculo da biomassa.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AES	Espectrometria de emissão atômica (<i>Atomic Emission Spectrometry</i>)
>	Maior
°	Graus
$\mu\text{g.mL}^{-1}$	Microgramas por mililitro
μL	Microlitros
Al	Alumínio
ALJ	Associação Limeirense de Joias
ANA	Agência Nacional de Água
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APDC	Ditiocarbamato de pirrolidina de amônia
B	Boro
Ba	Bário
bar	Unidade de pressão atmosférica
BG	<i>Background ou continuum</i>
Ca	Cálcio
CaCl_2	Cloreto de cálcio
CC	Capacidade de Campo
Cd	Cadmio
CETESB	Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental
Cirra	Centro Internacional de Referência em Reuso de Água

cm	Centímetro
Co	Cobalto
cps	Contagem por Segundo
Cr	Cromo
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
Cu	Cobre
D	Déficit de Umidade do Solo
DBO	Demanda Bruta de Oxigênio
Dg	Densidade Global
Dr	Densidade Real
ED-XRF	Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia (<i>Energy Dispersive X-Ray Fluorescence</i>)
EPA	Agência de Proteção Ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>)
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
g.L⁻¹	Gramas por Litro
g.m⁻¹	Gramas por metro
Ga	Gálio
Ge	Germânio
Ge(Li)	Germânio dopado com Lítio
GeV	Giga elétronvolts
g.kg⁻¹	Gramas por Kilograma
GPS	Sistema de Posicionamento Global (<i>Global Positioning System</i>)
H	Profundidade de Irrigação
H	Altura de água disponível
H + Al	Água mais Alumínio
H₂O₂	Peróxido de Hidrogênio
ha	Hectare
Hi	Lâmina Hídrica
HNO₃	Ácido Nítrico
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
ICP-AES	Espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma (<i>Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry</i>)

ICP-MS	Espectrometria de massa com fonte de plasma (<i>Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry</i>)
IUPAC	Associação Internacional de Química Pura e Aplicada (<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>)
K	Potássio
keV	Kilo eletrônvolt
kg.ha⁻¹	Kilograma por hectare
L	Litro
LMD	Limite Mínimo de Detecção
LMT	Limite Máximo de Tolerância
LNLS	Laboratório Nacional de Luz Síncrotron
M	Massa
M	Metro
M.O.	Matéria Orgânica
mA	Mili ampére
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
mg.kg⁻¹	Miligrama por Kilograma
mg.L⁻¹	Miligrama por Litro
MHz	Megahertz
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Na	Sódio
Ni	Níquel
N°	Número
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
°C	Graus Celsius
OMS	Organização Mundial de Saúde
P	Fósforo
P	Porosidade
Pb	Chumbo

PC	Computador Pessoal (<i>Personal Computer</i>)
pH	potencial hidrogeniônico
PM	Ponto de Murchamento
POLI-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
ppb	Partes Por Bilhão
ppm	Partes por Milhão
Prof	Profundidade
PROSAB	Programa de Saneamento Básico
Pt	Platina
QXAS	Programa de Análise Quantitativa de Raios X (<i>Quantitative X-Ray Analysis Software</i>)
R	Reserva
Rb	Rubídio
S	Enxofre
S.A.	Sociedade Anônima
S.B.	Saturação por bases
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
Se	Selênio
Si	Silício
Si(Li)	Silício dopado com Lítio
Sn	Estanho
SP	São Paulo
Sr	Estrôncio
SR-TXRF	Fluorescência de raios X por Reflexão Total com Radiação Síncrotron (<i>Synchrotron Radiation Total Reflection X-ray Fluorescence</i>)
Ti	Titânio
Tl	Tálio
TXRF	Fluorescência de raios X por Reflexão Total (<i>Total Reflection X-ray Fluorescence</i>)
UA	Umidade Atual
UC	Unidade Crítica
IUPAC	<i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i>

UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
V	Volume
WD-XRF	Fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (<i>Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence</i>)
WWAP	<i>World Water Association Program</i>
XRF	Fluorescência de raios X (<i>X-Ray Fluorescence</i>)
Y	Ítrio
Z	Número Atômico
Zn	Zinco

RESUMO

VIEIRA, C. B. Estudo da Absorção de Metais em Cultura de Milho Irrigado com Efluente de Esgoto Doméstico empregando a Fluorescência de Raios X por Reflexão Total com Radiação Síncroton (SR-TXR). 2004. 139 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

O uso de efluente secundário de esgoto doméstico na agricultura tem evoluído significativamente nas últimas décadas. Sob as condições do nosso país, é promissor a utilização de efluentes de esgotos domésticos, visando à reutilização dos nutrientes originários da decomposição da matéria orgânica.

A aplicação do método de irrigação que utiliza a técnica de infiltração por sulcos rasos como pós-tratamento dos efluentes de filtros anaeróbios pode ser utilizada em diferentes culturas, aliando os critérios da Engenharia Sanitária aos da Engenharia de Irrigação. Para tanto, o monitoramento e o controle ambiental exigem técnicas analíticas capazes de determinar vários elementos, entre eles os metais são de particular interesse, visto que estes têm efeitos tóxicos nos seres vivos.

Desta forma, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a absorção de metais provenientes do esgoto doméstico aplicado através de um sistema de irrigação por sulcos. Para

isto a cultura de milho (AG 405-AGROCERES) foi submetida a dois diferentes tratamentos: irrigação com efluente de esgoto doméstico e com água.

Após o crescimento vegetativo as plantas coletadas foram divididas em duas partes: grãos e folhas. Estas diferentes partes foram submetidas a procedimento de digestão em sistema aberto e a seguir analisadas por Fluorescência de Raios X por Reflexão Total com Radiação Síncrotron (SR-TXRF).

Foi observado que a concentração de metais nas plantas submetidas à aplicação com efluente foi mais elevada do que nas plantas irrigadas com água. Os resultados indicaram que a absorção de metais, nas folhas e na espiga, está diretamente relacionada com a taxa de aplicação no caso da irrigação com água. Mas no caso da irrigação com efluente foi observada uma maior absorção de metais quando a planta foi irrigada com a taxa de aplicação de 180 L, tanto para as folhas como para a espiga.

Palavras Chave: Metais pesados, esgoto doméstico, absorção, milho, radiação síncrotron, fluorescência de raios X, reflexão total.

1 INTRODUÇÃO

A Educação Ambiental é prioridade em nosso meio, devido às desastrosas conseqüências que a má utilização, pelo homem dos recursos naturais, vêm trazendo a toda humanidade. As profundas alterações na biosfera acarretam mudanças nas composições do ar, da água e do solo, alterando invariavelmente o comportamento dos seres vivos. Não só a escassez de água preocupa toda a sociedade, mas também a contaminação e a poluição dos corpos d'água, do solo e da atmosfera.

A quantidade de água disponível no globo permanece constante há 500 milhões de anos, entretanto, o aumento do consumo decorrente do crescimento população, dos altos níveis de poluição, da falta de políticas que minimizem o desperdício e de políticas de reuso entre outros, contribuem para aumentar os problemas de escassez de água vivenciados em várias partes do mundo.

A escassez de água não é um atributo exclusivo das regiões áridas e semi-áridas; regiões com recursos hídricos abundantes, mas insuficientes para atender as elevadas demandas, sofrem restrições de consumo, que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida.

Reaproveitamento ou reuso da água é o processo pelo qual a água, tratada ou não, é reutilizada para o mesmo ou outro fim. Essa reutilização pode ser direta ou indireta, decorrentes de ações planejadas ou não. O reaproveitamento de água foi um dos temas em debate no Fórum

Mundial da Água em Kyoto, realizado em Março de 2003, no Japão. Em alguns países o reaproveitamento ou reuso de água, é prática rotineira. O Brasil tem avançado lentamente nessa prática, já que sempre teve abundância de recursos hídricos, hoje se viu necessário mudar. O Centro Internacional de Referência em Reuso da Água (CIRRA), abrigado pela Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo (Poli-USP) e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, na capital paulista, e o Pólo de Reuso de Águas do Nordeste, em Campina Grande, na Paraíba; são exemplos dessa mudança.

No Brasil, há muitos exemplos de reuso de água, utilizada em processos agroindustriais, sendo o mais importante a fertirrigação com vinhaça, derivada da indústria produtora de álcool, a partir da cana-de-açúcar. Hoje técnica rotineira e altamente eficiente nas principais regiões canavieiras do País. O reuso em estações de tratamento de esgoto (ETEs), como acontece em São Paulo, com o programa de incentivo da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), vem sendo empregada na limpeza pública, lavagem de veículos, combate a incêndios, irrigação de áreas verdes, refrigeração de equipamentos, matéria-prima para indústria têxtil, de papel e de celulose, desobstrução de rede coletora, desobstrução de galerias de água pluviais, entre outros.

Nas condições brasileiras, é muito promissora a utilização de efluentes de esgotos domésticos na agricultura pelo seu potencial fertilizante, originário da decomposição da matéria orgânica. A aplicação do método de irrigação que utiliza a técnica de infiltração por sulcos rasos, como pós-tratamento dos efluentes de filtros anaeróbios, pode ser utilizada em diferentes culturas, aliando os critérios da Engenharia Sanitária aos da Engenharia de Irrigação.

Devido ao efeito tóxico de alguns metais, torna-se necessário um estudo mais abrangente sobre estes elementos presentes no efluente. Considerando que o local de realização da pesquisa é o maior pólo fabricante de jóias folheadas da América Latina, com cerca de 600 indústrias, de acordo com a Associação Limeirense de Jóias (ALJ). Não levando em conta, o grande número de pessoas que fazem trabalhos terceirizados em suas residências e a existência de fábricas clandestinas, ou seja, sem conhecimento e vistoria da CETESB (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo). Vê-se então, perante esse quadro,

a necessidade de se avaliar a presença de metais, que são jogados diretamente na rede de esgoto da cidade.

A contaminação ambiental pode ser estudada pelo emprego de bio-indicadores, sendo a análise foliar utilizada como critério para diagnosticar a deficiência ou toxidez dos nutrientes, servindo também como monitoramento ambiental, revelando a existência de elementos tóxicos nas plantas, que conseqüentemente podem ser transferidos à cadeia alimentar, causando diversos problemas devido a bioacumulação [PINTO e SIMABUCO, 2000].

Vários são os métodos e técnicas de análise quantitativa disponíveis para um determinado elemento ou composto químico, entretanto, a escolha de uma metodologia torna-se difícil, devido à concentração prévia do elemento ou composto. Desse modo a utilização de uma técnica mais simples é mais adequada que o uso de aparelhos sofisticados. A técnica de fluorescência de raios X por dispersão de energia – ED-XRF – e sua variante a reflexão total – TXRF – permite a detecção fácil e sensível de uma variedade de elementos em vários tipos de matrizes. Entre as vantagens desta técnica destaca-se a preparação simples das matrizes e a facilidade de determinar vários elementos simultaneamente.

2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar a absorção e/ou transferência de metais provenientes do efluente do tratamento anaeróbio do esgoto doméstico, aplicado através de um sistema de irrigação por sulcos, empregando a Fluorescência de Raios X por Reflexão Total com excitação por Radiação Síncroton (SR-TXRF). Para isto, a cultura de milho, *Zea mays L.*, AG 405-AGROCERES, foi submetida a dois diferentes tratamentos: irrigação com efluente de esgoto doméstico e irrigação com água potável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No passado, livros clássicos de Economia, traziam como exemplo de “bem não econômico”, isto é, aquele que é tão abundante e inesgotável, sem valor econômico, a água, o oxigênio, o sal de cozinha, e outros. No planeta há muita água, mas cerca de 97,5% é água salgada, e apenas 2,5% é água doce; sendo que, 2% está nas geleiras e apenas 0,5% está disponível nos corpos d’água da superfície, rios e lagos, e 95% está no subsolo, que é a grande “caixa d’água” de água doce da natureza. Comparando-se a distribuição dessa água doce no mundo, com a distribuição da população, verifica-se que ela está mal distribuída [NOGUEIRA, 2003].

A quantidade de água disponível no planeta permanece constante há 500 milhões de anos; porém, o aumento do consumo decorrente do crescimento da população, as elevações dos níveis de poluição, a falta generalizada de políticas que visam minimizar os desperdícios em diferentes escalas e de políticas de reuso de água, entre outros, contribuem para agravar os problemas de escassez de água vivenciados em várias partes do mundo [BRITO, 2003].

A Organização das Nações Unidas (ONU), promoveu, em Kyotto, no Japão, o III Fórum Mundial das Águas, em março de 2003, que deu seqüência a uma série de encontros, no sentido de responder aos enormes desafios, representados pela crítica situação mundial dos recursos hídricos. Os principais desafios foram reunidos pelo Programa Mundial de Avaliação dos Recursos Hídricos (WWAP – *World Water Assessment Programme*), que engloba esforços de 23

órgãos do Sistema das Nações Unidas, e que publicou o primeiro Informe Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, com dados globais sobre a situação da água. Alguns dos grandes desafios indicados pela WWAP:

- Atender as necessidades básicas, permitindo o acesso à água doce de toda a população mundial, em quantidade e qualidade suficientes. Na pior das hipóteses, nada menos que 80% da população mundial, sofrerão com a falta de água ou com problemas de saneamento até metade do século 21. Hoje são 2 bilhões de pessoas com escassez de águas e problemas de saneamento básico.
- Assegurar o abastecimento de alimentos, considerando que o aumento da população mundial implica em uso cada vez maior de água doce para a produção de alimentos. Atualmente 70% das águas são utilizadas na irrigação, as estimativas são de que a produção de uma tonelada de grãos demanda 1.000 toneladas de água. Em 2050 a população mundial será de cerca de 9 bilhões de habitantes, 50% a mais do que os atuais 6 bilhões.
- Proteger os ecossistemas, garantindo que a retirada de água dos rios e dos lençóis freáticos, para atender as necessidades humanas, não impliquem em prejuízo para a complexa teia biológica do planeta. As espécies animais e vegetais também necessitam de água para sobreviverem e multiplicarem-se.
- Compartilhamento dos recursos hídricos, assegurando um sistema de gestão que responda adequadamente aos múltiplos conflitos associados ao uso da água, envolvendo os diferentes tipos de usuários.
- Gestão dos riscos, respondendo aos diversos riscos ligados aos recursos hídricos, como a erosão, as inundações, a contaminação, as secas e as tempestades. É um desafio que implica o uso eficiente da ciência e da tecnologia em benefício da gestão adequada das águas.

- Valorização das águas, dar valor econômico a um bem natural, garantindo o seu uso racional e sustentável, não agravando a exclusão de amplos setores da população aos serviços de água potável.
- Gestão integral da água no âmbito público, garantindo a ampla participação popular nas decisões e a observação a princípios como a descentralização, a gestão por bacias, a cooperação e a solidariedade.
- Melhorar os conhecimentos básicos, construindo sistemas de informações cada vez mais eficientes, dinâmicos e ágeis sobre os recursos hídricos, o que ajudará, por exemplo, a prevenir episódios que coloquem em risco o abastecimento público de água.
- Água para uso energético. Hoje cerca de 2 bilhões de pessoas não tem acesso a energia elétrica confiável; as fontes hidráulicas são de extrema importância para a produção de energia, o desafio é fazer com que os interesses do setor elétrico não sejam colocados em primeiro plano em detrimento de outros usos da água essenciais para a comunidade humana.
- Água para uso industrial, garantir às indústrias água sem prejudicar o abastecimento público, já que as mesmas consomem cerca de 22% da água doce do planeta. É fundamental, que a água usada pelas indústrias, retornem em condições adequadas para a natureza.
- Água para as cidades, a urbanização é irreversível. Em 2030 cerca de 60% da população mundial estará morando nas cidades, onde o consumo de água é maior.

Em termos de participação de representantes governamentais, três preocupações principais foram às atenções dos delegados:

1. Governanças – Construção do sistema de gestão que responda aos desafios associados aos recursos hídricos. A responsabilidade pela gestão é dos governos, mas diversos setores são convocados a participar.
2. Financiamento – Discussão das formas de financiamento das obras necessárias nas áreas de recursos hídricos.
3. Cooperação Internacional – Debate sobre a cooperação internacional para assegurar o uso sustentável dos recursos hídricos, envolve a cooperação científica em termos de gestão e financiamento.

A escassez de água é resultante do crescente consumo, como também do mau uso dos recursos hídricos. O desperdício é notado no uso doméstico, na deficiência técnica e administrativa dos serviços de abastecimento como vazamentos e rompimentos de redes e na agricultura em métodos ineficientes de irrigação; além, do não reuso da água para atividades industriais. É agravada também, em virtude da desigualdade social, falta de manejo e do uso sustentável dos recursos naturais, e números divulgados pela ONU deixam claro que controlar o uso da água é deter poder [HERNANDEZ e ALMEIDA JÚNIOR, 2001].

A carência de água para consumo é uma realidade em regiões áridas, fazendo-se necessário compartilhar a água para abastecimento humano com a irrigação das colheitas [ANGELAKIS, 1999]. O Brasil detém 13,8% da disponibilidade hídrica mundial, porém a escassez de água também é uma realidade na região semi-árida do país [BRITO, 2003].

O Aquífero do Guarani, que compreende oito Estados brasileiros e três países vizinhos, possui uma reserva permanente da ordem de 45.000 km³ sob condições naturais, somente uma parcela das reservas reguladoras é passível de exploração [REBOUÇAS, 1992]. A qualidade da água e a possibilidade de captação nos próprios locais onde ocorre às demandas fazem com que o aproveitamento das águas do Aquífero assumam características econômicas, sociais e políticas destacadas para abastecimento da população. O risco de deterioração do Aquífero em decorrência do crescente volume explorado e do crescimento das fontes de poluição pontuais e difusas, já é

uma triste realidade. Para essa situação exige-se um gerenciamento adequado por parte das esferas do governo federal, estadual e municipal, sobre as condições de aproveitamento do aquífero [REBOUÇAS, 1992]. Um estudo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) aponta que em determinados locais, o aquífero está com altos níveis de contaminação, devido ao uso descontrolado de agrotóxicos [LOPES, 2002].

Perante a situação mundial dos recursos hídricos, medidas para aumentar a sua disponibilidade e reduzir os níveis de poluição, têm sido prioritárias no mundo todo. Entre elas: o reuso da água; manejo adequado da água de irrigação, reduzindo a lixiviação e, ou escoamento superficial de agrotóxicos, e a conscientização da população [BRITO, 2003]. Portanto, o uso racional da água é uma das saídas para combater a escassez do produto, que precisa ser tratada como bem econômico essencial à vida, à saúde, à economia, a indústria, a agricultura e por todos os setores da sociedade [NOGUEIRA, 2003].

No Brasil, a demanda de água em residência, é de cerca de 200 litros diários; sendo: 27% consumo (cozinhar, beber água), 25% higiene (banho, escovar os dentes), 12% lavagem de roupa, 3% outros (lavagem de carro) e 33% descarga de banheiro; o que mostra, tanto nas cidades como nas indústrias, se houvessem duas redes de água, reusando “água cinzenta” (águas resultantes de lavagens de carro e banho) para descarga de latrinas, pode-se economizar 1/3 de toda água [NOGUEIRA, 2003].

Reaproveitamento ou reuso da água é a utilização da água, por uma segunda ou mais vezes reaproveitamento que ocorre espontaneamente na natureza através do ciclo hidrológico, essa água pode ser tratada ou não, pode ser reutilizada para o mesmo ou outro fim [NOGUEIRA, 2003]. Essa reutilização pode ser direta ou indireta, decorrentes de ações planejadas ou não [NOGUEIRA, 2003]:

- Reuso indireto não planejado da água – a água utilizada em alguma atividade humana, é descarregada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada.

- Reuso indireto planejado da água – os efluentes depois de tratados são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para serem utilizadas a jusante, de maneira controlada, no atendimento de algum benefício. Pressupõe um controle sobre eventuais descargas de efluentes no caminho, garantindo que o efluente tratado estará sujeito apenas a misturas com outros efluentes que também atendam ao requisito de qualidade.
- Reuso direto planejado das águas – os efluentes, depois de tratados, são encaminhados diretamente de seu ponto de descarga até o local do reuso, não sendo descarregado no meio ambiente.
- Reciclagem da água – é o reuso interno da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento, ou em outro local de disposição. É um caso particular de reuso direto planejado.

O reuso da água busca evitar o consumo de água potável em procedimentos onde seu uso pode ser dispensável, podendo ser substituída, com vantagens econômicas, industriais, residenciais e comerciais. Na utilização urbana, como lavagem de vias públicas, pátios, veículos, irrigação de áreas verdes, desobstrução de rede coletora, desobstrução de galerias de água pluviais, e outros. O reuso planejado da água faz parte da estratégia global, para administração das qualidades das águas, proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e pela Organização Mundial de Saúde; em vários países do mundo, o reuso planejado já é uma solução com sucesso. No Brasil é uma novidade, que diante da atual escassez dos recursos hídricos passou a ser uma necessidade [NOGUEIRA, 2003].

A Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) desenvolve, através do tratamento de esgoto, a água de reuso; que é fornecida para alguns indústrias e prefeituras da região Metropolitana de São Paulo [SABESP, 2003]; e, utiliza em suas instalações o reuso planejado, como a recirculação de água de lavagem de filtros. Os principais processos industriais, que permitem o uso de água reciclada são os de produtos de carvão, petróleo, produção primária de metal, curtumes, indústrias têxteis, químicas, de papel e celulose [SABESP,

2003]. No Paraná, a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) a exemplo da SABESP, desenvolve um projeto de reaproveitamento do esgoto doméstico tratado para distribuí-lo às indústrias e administrações públicas [SANEPAR, 2003].

Diante dessa situação, do desenvolvimento e da difusão de tecnologias para reutilização de efluentes industriais e esgotos, criou-se o Centro Internacional de Referência em Reuso da Água (CIRRA) abrigado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli-USP) e Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), na cidade de São Paulo. O objetivo do CIRRA é oferecer treinamento e divulgar informações que estimulem o reaproveitamento das águas servidas, uma das alternativas para diminuir a escassez de água. Localiza-se em Campina Grande, na Paraíba, o primeiro Pólo de Reuso de Águas do Nordeste, criado em parceria com a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Agência Nacional de Águas (ANA), que tem como objetivo desenvolver pesquisas e estimular o reuso de água.

O aproveitamento planejado de águas residuárias, efluentes tratados ou não, na agricultura, é uma alternativa no controle da poluição de corpo d'água, disponibilização de água e fertilizantes para as culturas, reciclagem de nutrientes e aumento da produção agrícola. É preciso, atentar-se aos impactos causados ao meio ambiente por esta prática, sobretudo no que diz respeito à preservação do sistema solo-água-ambiente [PROSAB, 2000].

As primeiras experiências de irrigação com efluentes tiveram como objetivo o tratamento de esgotos, mas a seguir surgiu o interesse pela irrigação com fins de produção agrícola. Todavia, o desenvolvimento da microbiologia sanitária e as crescentes preocupações da saúde pública desaconselhavam tal prática em meados deste século [MARA e CAIRNCROSS, 1989].

O sistema de pós-tratamento de efluente por escoamento superficial, é destinado a esgotos distribuídos ao longo de uma faixa superior de terrenos com certa declividade, tal que haja um escoamento e o efluente final ser coletado em valas na parte inferior; para tanto, o terreno deve possuir baixa permeabilidade, com a maior parte do líquido escoando superficialmente [VON SPERLING, 1996]. Utilizado, em especial, o sistema anaeróbio de

tratamento de esgoto se caracteriza por ser um sistema de redução na produção de sólidos, no consumo de energia, na demanda da área, nos custos de implantação; na produção metano, na possibilidade de preservação da biomassa e na baixa produção de lodo [TERADA et al., 1985]. Porém, o efluente não atende a Legislação Brasileira, 80% de remoção de DBO, sendo necessário o pós-tratamento deste efluente [VON SPERLING, 1996; LETTINGA et al., 1996 apud CHERNICHARO, 1997]. O processo de disposição controlada no solo por escoamento superficial (“overland flow”), é um sistema alternativo de pós-tratamento, que proporciona uma alta remoção de DBO, N (nitrogênio) e P (fósforo); além, do baixo custo de implantação e operação [VON SPERLING, 1996], e atende aos padrões de lançamento em corpos d’água da legislação vigente.

Nos procedimentos de reuso de esgoto doméstico para a irrigação de culturas, o solo funciona como um reator, no qual interagem a vegetação, os microrganismos, e os seus componentes físicos e químicos. Nesse sistema, a escolha da cultura é de grande importância, tanto pela sua efetiva participação no ciclo da água, como pela proteção do solo, contra a erosão e movimento de infiltração. Outro aspecto fundamental é a arquitetura e distribuição do sistema radicular, o que beneficia sobremaneira o processo de tratamento. Contudo na conversão da matéria orgânica, proveniente dos esgotos, a ação dos microrganismos presentes no perfil do solo é fundamental. Por essa razão as características bacteriológicas dos esgotos domésticos são limitadas à aplicação do líquido, notadamente se o método de irrigação a ser usado for aspersão [CAMPOS, 1999].

Porém, diversos fatores contribuíram para que o interesse pela irrigação com esgotos fosse renovado. Dentre eles, a crescente escassez de recursos hídricos, o avanço do conhecimento técnico-científico e as limitações do reuso agrícola e suas inegáveis vantagens, tais como o controle da poluição, economia de água e fertilizantes, reciclagem de nutrientes e aumento da produção agrícola.

O interesse pelo reuso controlado, ou seja, seguro do ponto de vista sanitário e otimizado do ponto de vista agrícola, surgiu do próprio reconhecimento de que a proibição velada não logrou banir a utilização de esgotos na agricultura. Mas, apenas cresceu a prática espontânea ou

clandestina por parte de pequenos agricultores, diante da escassez de água e, ou, cientes do potencial fertilizante das águas residuárias.

Atualmente, as experiências incluem diversas situações, o reuso controlado, como parte de planos e programas governamentais, e as práticas sem qualquer controle ou planejamento causando sérios riscos à saúde pública. O Programa Nacional de Irrigação, no Peru, estima à implantação de 18.000 hectares de água irrigada. Porém, cerca dos 4.300 hectares hoje irrigados, aproximadamente 70% são utilizadas para o cultivo de hortaliças, a maioria com água residuária bruta. Já, em Israel, prevê-se que por volta de 2010, os esgotos tratados corresponderão a 30% da água disponibilizada para a agricultura, atualmente utilizada para o cultivo do algodão [SHELEF, 1991].

Países como França, Espanha, Itália, Austrália, Estados Unidos e Israel utilizam a técnica de aplicação de efluente na irrigação [KÖNIG et al, 1997]; em Jeezrael, Israel, a aplicação de efluente na irrigação será de 80%, em um futuro breve [FRIEDLER, 1999]. No Brasil, estudos demonstram um desenvolvimento nesta direção [KÖNIG et al, 1997].

As áreas irrigadas com águas residuárias em diferentes países do mundo pode ser observada na Tabela 3.1.

O reuso de efluentes não deve ser encarado como uma aplicação indiscriminada e sem critérios, deve existir um elo entre a Engenharia Sanitária e a Engenharia de Irrigação, de forma que o efluente a ser aplicado no solo não contamine o lençol freático, e tampouco leve a saturação dos nutrientes do solo, entre outros [CORAUCCI FILHO et al, 1998]. Ressalta-se, portanto, a necessidade de se optar por uma cultura adequada e por um dimensionamento do projeto de irrigação conveniente para manterem-se as condições sanitárias mínimas exigidas por norma [HARUVY, 1997; VIEIRA, 1995].

A Organização Mundial de Saúde e o Banco Mundial preocupados com a aplicação indiscriminada de esgoto na agricultura convocaram em 1985, uma reunião entre técnicos e cientistas, com a finalidade de discutir os aspectos sanitários desse processo e atualizar

documentos relacionados ao tema - como o Informe Técnico OMS N° 517, 1973 -, visto o avanço tecnológico e o aumento do tratamento de esgoto para as décadas seguintes. Ressalta-se a importância desta modalidade de tratamento, diante da necessidade de se conservar os recursos hídricos, dispor os resíduos adequadamente, controlar a contaminação da água, e produzir alimentos em muitos lugares do mundo. O documento indica a necessidade de revisão à luz de novas evidências epidemiológicas e da disponibilidade de novas tecnologias sanitárias e agrícolas.

Os resultados do encontro foram utilizados para elaboração das diretrizes, “Declaração de Engelberg”, para o uso saudável do esgoto e do lodo na agricultura e piscicultura, publicado pela OMS em 1989 [MARA, 1999]. As pesquisas relacionadas com o reuso de esgoto doméstico por processos de irrigação estão ligadas às lagoas de estabilização [KÖNIG et al, 1997; DARWISH, 1999; MARA, 1999], atendendo as recomendações da OMS. Estudos desenvolvidos pelo Programa de Saneamento Básico (PROSAB) ressaltam considerações de abundância de nutrientes e de água [CAMPOS, 1999].

Tabela 3.1 - Áreas irrigadas com águas residuárias em diferentes países [GHEYI et al, 1999].

País	Área Irrigada (ha)
China	1.330.000
México	250.000
Índia	73.000
Chile	16.000
Estados Unidos	13.500
Kuwait	12.000
Australia	10.000
Israel	8.800
Tunísia	7.400
Alemanha	6.800
Peru	5.500
Argentina	3.700
Arábia Saudita	2.900
Sudão	2.800
África do Sul	1.800
Bahrein	800
TOTAL	1.745.000

Processos de aplicação de esgoto no solo são eficientes na remoção de metais pesados [PROSAB, 2000], essa eficiência é resultante da capacidade de absorção da camada orgânica na

superfície do solo e os metais, tendem a se acumular próximos ao local de aplicação de esgoto, pois uma vez absorvido, ele não é mais liberado para o meio pelo excesso de drenagem de água. A vegetação localizada nessa área tem a sua concentração de metais elevada. O solo, portanto, possui uma eficiente capacidade de remoção de metais, desde que esses não ultrapassem certas concentrações; acima das quais pode ocorrer, lixiviação para o subsolo, inibição no crescimento das plantas e incorporação à cadeia alimentar. A absorção e/ou transferência metais pode ser analisado por diferentes técnicas, entre elas a técnica de Fluorescência de Raios X por Reflexão Total e suas variantes.

A Tabela 3.2 apresenta o tratamento requerido para a aplicação de águas residuárias na agricultura.

Tabela 3.2 – Diretrizes recomendadas pela OMS para a qualidade microbiológica das águas residuárias utilizadas na agricultura¹.

Categoria	Condições de Aproveitamento	Grupo Exposto	Nematóides Intestinais² (média aritmética ovos/100mL)³	Coliformes Fecais (média geométrica/100m L)	Tratamento Requerido
A	Culturas consumidas cruas, campos esportivos, jardins públicos	Trabalhadores, consumidores, público	≤1	≤1000 ⁴	Série de Lagoas de Estabilização (tratamento equivalente)
B	Culturas de cereais industriais, forrageiras, prados e árvores ⁵	Trabalhadores	<1	Não se recomenda nenhuma norma	Lagoas de Estabilização por 8 a 10 dias (tratamento equivalente)
C	Categoria B sem trabalhadores e o público exposto	Ninguém	Não se aplica	Não se aplica	Sedimentação Primária

¹ Em casos específicos deve-se considerar os fatores epidemiológicos, socioculturais de cada região e modificar os padrões de acordo com a sua exigência.

² Espécie *Ascaris* e *Trichuris* e *Ancilostoma*.

³ Durante o período de irrigação.

⁴ Convém estabelecer uma diretriz mais restrita (<200 CF/100mL) para prado público, como os hotéis, onde o público pode entrar em contato direto.

⁵ No caso de árvores frutíferas, a irrigação deve cessar duas semanas antes da colheita da fruta e esta não deve ser colocada na superfície do solo. Não é conveniente irrigar por aspersão

Fonte: adaptado de WHO, 1989.

A remoção de metais pesados e o seu efeito prolongado no solo são investigados em vários países [PETERS, 1979].

A EPA, em 1989, desenvolveu e publicou a proposta de Regulamentação 503 para a avaliação pública do limite de concentração de metais. Identificou-se, porém, algumas falhas em tal publicação, iniciando-se, então, em 1990, e finalizando em 1992, uma revisão, onde foram estabelecidas as bases para as elaborações dos valores limites para os metais [BETTIOL e CAMARGO, 2000].

Os riscos de metais para as plantas, segundo a EPA, são determinados pela análise de diferentes níveis de redução de crescimento vegetativo, associados à concentração de metais na folha e a carga de metais adicionada ao solo; análise dos dados disponíveis que identificam os níveis de metais presentes nos tecidos associados com o início da detecção de redução na produção, considerando-se que a absorção de metais pelas plantas ocorre de maneira linear e é diretamente proporcional a quantidade aplicada ao solo [BETTIOL e CAMARGO, 2000].

Os metais são cumulativos no solo, entretanto, diversos fatores do solo interferem na dinâmica da sua disponibilidade tais como o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC), a textura e o teor de matéria orgânica. Portanto, dependendo das condições ambientais os metais podem estar presentes no solo, em formas não disponíveis para a planta. Neste caso, a passagem dos metais para a cadeia alimentar dependerá das características do solo e do tipo de planta, já que espécies vegetativas têm capacidades variáveis de absorção de metais [SANEPAR, 1999].

Os lodos de estações de tratamento que recebem efluentes domésticos contêm pequena quantidade de metais provenientes da natureza dos resíduos e das canalizações. Podem ocorrer, entretanto, ligações clandestinas de pequenas fontes de contaminações de metais, tais como: laboratórios fotográficos, fábricas de baterias, tintas, cromagem e jóias, que adicionam um determinado nível de metais na rede [SANEPAR, 1999].

Os metais de um modo geral estão presentes na natureza e alguns são essenciais aos processos metabólicos, dentre eles, o Cobre, o Ferro, o Manganês e o Zinco, considerados micronutrientes necessários às plantas; outros metais como o Cádmiio não tem qualquer utilidade para as plantas, podendo tornar-se tóxicos ao homem e aos animais [SANEPAR, 1999].

3.1 REATORES ANAERÓBIOS UASB

O Brasil se encontra em posição de vanguarda em nível mundial, pela aceitação e disseminação da tecnologia anaeróbia para tratamento de esgoto doméstico, notadamente dos reatores UASB [CHERNICHARO, 1997]. O emprego de reatores UASB se proliferou pelo estados brasileiros, inicialmente pelo Paraná e pela Bahia, ultrapassando o descrédito a essa tecnologia. O interesse se disseminou pelas instituições de pesquisa do país, tendo contribuído para a evolução e um maior emprego destes reatores na atualidade.

Para esgotos sanitários essa tecnologia depende da temperatura dos mesmos devido à baixa atividade das bactérias anaeróbias em temperaturas abaixo de 20°C e à inviabilidade econômica de aquecimento dos reatores. Desta forma, os reatores anaeróbios tornam-se bem atrativos para os países de clima tropical e subtropical.

Os reatores anaeróbios apresentam, tempo de retenção celular maior que o tempo de detenção hidráulico, o que garante a digestão de todo material carbonáceo pela biomassa do reator. A maior parte do material orgânico biodegradável é convertida em biogás (70 a 90%), restando uma pequena parcela, que é convertida em biomassa microbiana (5 a 15%), que irá constituir o lodo excedente do sistema, o qual apresenta-se mais concentrado, em quantidade menor e com boas características de desidratação. O material não convertido em biogás ou em lodo deixa o reator com material não degradado (10 a 30%). Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do processo anaeróbio [CHERNICHARO, 1997].

Tabela 3.3 – Vantagens e desvantagens do processo anaeróbio.

Vantagens	Desvantagens
baixa produção de lodo;	bactérias susceptíveis à inibição por um grande número de compostos;
baixo consumo de energia;	partida do processo lenta, quando sem sementeira;
produção de gás metano;	possibilidade de geração de maus odores;
possibilidade de preservação da biomassa (tempo de retenção celular \geq tempo de detenção hidráulico);	baixa remoção de nutrientes e patógenos;
tolerância a altas cargas orgânicas.	necessidade de pós-tratamento.

Nos reatores a biomassa é formada por auto-adesão, formando flocos e grânulos densos suspensos, que se dispõem em camadas de lodo ao longo do reator, denominados reatores manta de lodo ou reatores UASB (Figura 3.1).

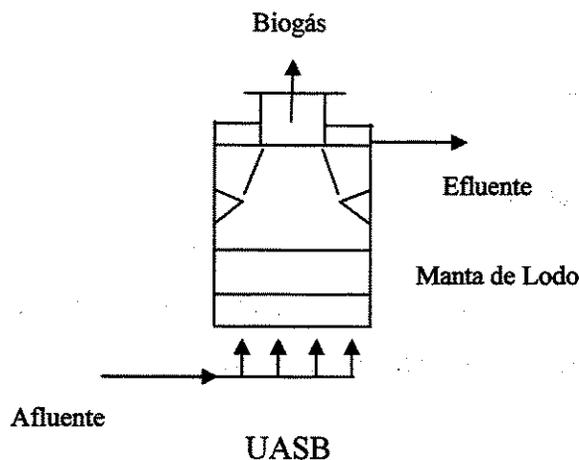


Figura 3.1 – Configuração de um reator manta de lodo (UASB) [SILVA, 2003].

Os estudos com a utilização de anéis de bambu como recheio, para tempos de detenção hidráulica distintos em filtros anaeróbios, de fluxo ascendente, apresentaram os seguintes resultados: o valor médio da concentração da DBO final foi de 143 mg/L, acima, portanto, dos 60 mg/L exigidos pela legislação; o gradiente de remoção de DQO e sólidos, ao longo da altura dos

filtros, foi maior até aproximadamente 40 cm de altura, indicando que filtros com pouca altura de meio suporte apresentam desempenho adequado; o efluente atendeu à remoção de sólidos sedimentáveis com concentrações inferiores a 1 mg/L; a eficiência na remoção de N e P foi pequena e, às vezes, nula no decorrer do monitoramento dos filtros [CAMARGO, 2000].

3.2 DISPOSIÇÃO DE ESGOTO NO SOLO

A disposição de esgoto no solo é uma técnica de tratamento e reuso pelo reator solo-planta das características físico-químicas do efluente ou lodo aplicado, é uma forma de devolver os elementos aos seus reservatórios naturais: o N e o C à atmosfera (N_2 e CO_2) e o P ao solo.

A parcela do despejo que infiltra no solo sofre tratamento por percolação, o que possibilita as ações de absorção e as atividades dos microrganismos, que convertem a matéria orgânica em matéria mineralizada (nutrientes), que fica à disposição da vegetação e se incorpora ao solo. Desta forma, ocorre o reuso agrícola; outra forma de reuso é a recarga do lençol freático.

A escolha do método de tratamento a ser utilizado será função da finalidade do empreendimento, das características locais, tais como o clima, solo, topografia, aspectos regionais, dentre outros.

O tratamento do solo é um sistema controlado, não podendo ser confundido com o despejo e lançamento indiscriminado de resíduos.

Podemos citar como algumas das vantagens do emprego de efluentes no solo: benefício agrícola, baixo investimento, pequeno custo de operação, baixo consumo de energia e, na maioria dos casos, a não-existência de descarga em corpos hídricos. Porém a disposição de despejos em áreas distantes mais de 20 km não é economicamente viável [USEPA, 1981].

A aplicação dos despejos no solo tem como objetivo o tratamento ou melhoria da qualidade do substrato aplicado [CAMPOS, 1999], que são atingidos com a remoção de

compostos orgânicos e inorgânicos. O tratamento adequado visa à reposição de todos os sais minerais para os seus reservatórios naturais no meio ambiente: carbono, oxigênio e nitrogênio na atmosfera; fósforo, potássio, enxofre, dentre outros, no solo. Esses minerais podem ser retirados atendendo à dinâmica dos ciclos biogeoquímicos.

Os parâmetros de controle e operação do sistema, como o volume de aplicação, o período e a frequência de aplicação, devem ser administrados em quantidade que o sistema solo-planta possa suportar. As características do solo, relevo, clima, área disponível, bem como a vazão do efluente que se deseja tratar, são fundamentais para a escolha do método a ser empregado.

Solos que recebem alta concentração de substrato têm, em pouco tempo, seu desempenho no tratamento prejudicado, exigindo uma interrupção na atividade de disposição. O contato do efluente com a matriz do solo e a capacidade de absorção das plantas são responsáveis pela remoção dos nutrientes. A capacidade de absorção de um solo é reduzida com o passar do tempo, sendo necessárias à adoção de práticas agrícolas, como a rotação de culturas. Os principais nutrientes utilizados pelas plantas são o nitrogênio, o fósforo, o potássio, o enxofre, o cálcio e magnésio.

Os métodos de disposição de esgoto no solo podem ser divididos em três classes: métodos de pequena, média e larga escala. Essa classificação se refere à vazão de esgoto tratada por cada sistema. Os métodos de pequena escala se referem aos sumidouros, valas de filtração e valas de infiltração, entre outros. Os métodos de média escala se referem ao filtro de areia e ao “wetland”, e os métodos de larga escala se referem ao escoamento superficial, à infiltração-percolação e à irrigação.

Comparando os métodos de larga escala (Tabela 3.4) [USEPA, 1981], pode-se dizer que a irrigação produz efluente de melhor qualidade entre os demais métodos.

No escoamento superficial, o efluente é aplicado por aspersores ou por tubos furados localizados no patamar de uma rampa de cerca de 50 m, constituída por solo de baixa permeabilidade, como os argilosos, com declividade de 2% a 8%, onde são plantadas, de

preferência, gramíneas. À medida que o efluente percola no terreno, uma parcela vai para atmosfera por evapotranspiração, parte infiltra no solo e o restante é coletado por canais que ficam no final da rampa. Os microrganismos estabelecem-se na grama, configurando o reator deste método de tratamento. A Figura 3.2 ilustra o sistema de distribuição por tubos furados.

A infiltração ou a percolação depende do tipo e da geologia do solo, exigindo que o mesmo seja muito permeável com extensa formação geológica. O tratamento está relacionado com a textura, a estrutura e a espessura da camada não-drenante do solo. A remoção dos poluentes é feita pela “filtração” das substâncias contidas nos efluentes percolados pelo solo. A capacidade de remoção de nutrientes pelo solo é limitada quando se usa um alto volume de aplicação. O tratamento físico, químico e biológico no solo ocorre devido à passagem do efluente por sua matriz, tendo como objetivos: recarga do lençol freático; reutilização dessa água atendendo a diferentes usos e finalidades. Com o tempo, este solo, perde a sua capacidade drenante e eficiência com possível entumescimento, bem como provável ocorrência de salinização pela presença de sais no solo e no lençol com a possível colmatção do solo. Eficientes resultados de remoção de DQO e SS, 80% e 90% respectivamente, foram obtidos quando adotadas taxas de aplicação variáveis com a profundidade do leito filtrante, utilizando reatores piloto de laboratórios, com alturas de 40 cm, 80 cm e 120 cm de areia média, da região litorânea do Espírito Santo, e ciclo operacional de 2 dias de aplicação e 5 dias de descanso [ANDREOLI *apud* CAMPOS, 1999]. A Figura 3.3 ilustra o método de infiltração-percolação.

Tabela 3.4 - Qualidade esperada do efluente tratado por aplicação no solo^a.

Constituintes	Irrigação ^b		Infiltração por Percolação ^c		Escoamento Superficial ^d	
	Média	Máximo	Média	Máximo	Média	Máximo
DBO (mg O ₂ /L)	<2	3 ^e	5	10	10	<15
Sólidos Suspensos ^g	<5	<8 ^e	<10	<20	10	<20
Nitrogênio Amônia ^g	<1	<0,1	2	1	<4	<8
Nitrogênio Total ^g	<5	<0,3	<5	<5	5	<10 ^f
Fósforo Total ^g	0,5	0	0,5	10	4	<6
Coliformes Fecais (NMP/100 mL)	<2	<10	<2	<200	200	<2000

^a - Taxas de Aplicações: Irrigação (1,3 a 5 cm/sem); Infiltração-Percolação (10 a 120 cm/sem); Escoamento Superficial (6 a 20 cm/sem)

^b - Percolação de efluente primário ou secundário por 1,5 m de solo insaturado

^c - Percolação de efluente primário ou secundário por 4,5 m de solo insaturado; remoção de CF e fósforo reforçada pela distância.

^d - Rampa de 30 a 36 m.

^e - Concentração depende da taxa aplicada e do cultivo.

^f - Altos valores são esperados quando operando em inverno moderado ou com aplicação de altas taxas para efluente secundário.

^g - Unidades em mg/L.

Fonte: adaptado de USEPA (1981)

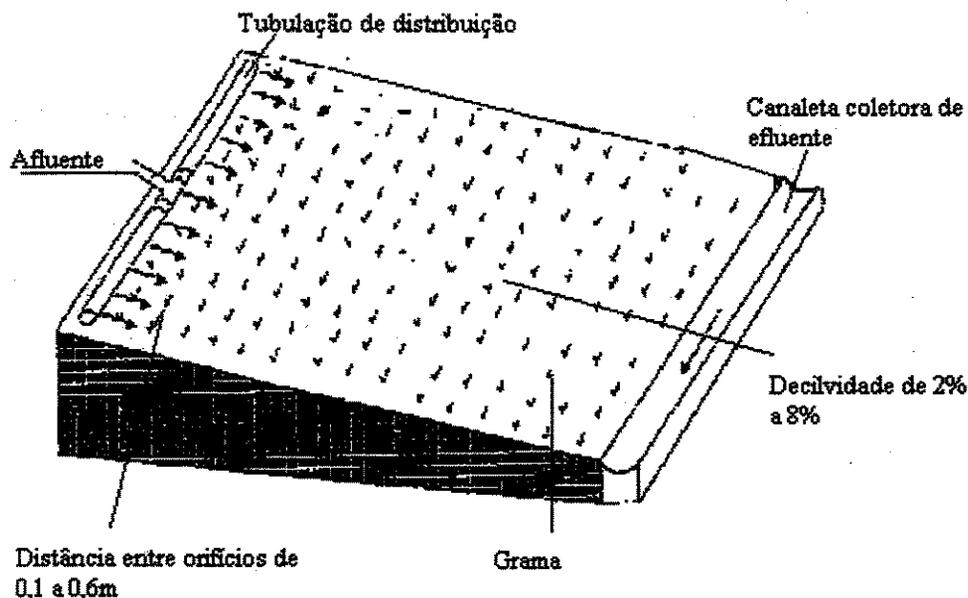


Figura 3.2 – Configuração do Método de Escoamento Superficial. Fonte: (adaptado de SILVA, 2003).

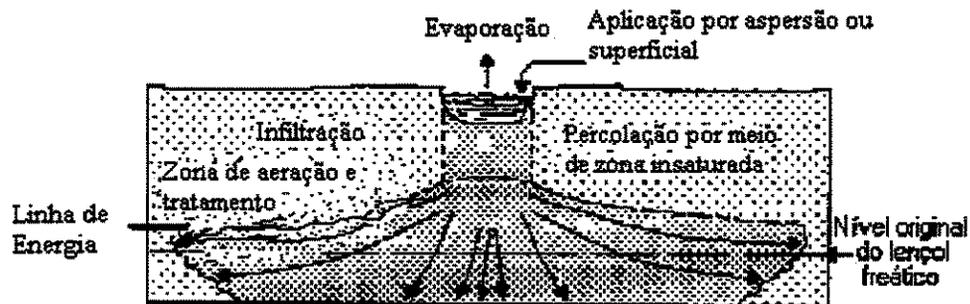


Figura 3.3 – Configuração do Método de Infiltração-Percolação. Fonte: (adaptado de SILVA, 2003)

A irrigação é o método de tratamento e reuso do efluente aplicado que tem como condicionantes o tipo de solo, a demanda hídrica da cultura e a frequência de aplicação. Trata-se de um método promissor no tratamento posterior do esgoto tratado, que, como foi mostrado na Tabela 3.4, apresenta o efluente de melhor qualidade. Esse tema será abordado a seguir.

3.3 IRRIGAÇÃO

Definida como aplicação água no solo com o objetivo de atender à demanda hídrica da planta; irrigar não é “molhar”, e sim disponibilizar à planta a quantidade requerida de água através de um sistema de irrigação compatível com o tipo de solo, declividade do terreno, capacidade de retenção de água no solo e tipo de cultura, tendo como objetivo aumentar a produtividade e qualidade do produto ou obter colheitas fora das épocas normais, sem os inconvenientes da saturação do solo e das perdas por percolação, as quais podem comprometer o lençol freático [VIEIRA, 1995].

Nas regiões áridas e semi-áridas, a irrigação é essencial para a viabilidade econômica da agricultura [PESCOD, 1992], enquanto que, nas regiões úmidas e semi-úmidas, a irrigação é requerida como forma suplementar, com o objetivo de corrigir a distribuição irregular das chuvas ao longo do ano, não comprometendo o metabolismo da planta [VIEIRA, 1995].

3.3.1 Condições Básicas para uma Irrigação Eficiente

Para desenvolver uma irrigação eficiente, aconselha-se a adoção das seguintes medidas [GHEYI et al, 1999]:

- aplicação da quantidade de água necessária;
- irrigação com água de qualidade aceitável;
- estabelecimento de uma frequência adequada de irrigação;
- emprego de técnicas convenientes de irrigação;
- prevenção da salinização na zona radicular por meio de lixiviação;
- controle do acúmulo de água sobre a superfície do solo, mediante um drenagem apropriada;
- manejo adequado dos nutrientes para os cultivos.

3.3.1.1 Aplicação da quantidade de água necessária

Aproximadamente 99% da água absorvida pela planta é perdida pelos processos de transpiração e evaporação; portanto, a água requerida pela planta é equivalente ao requerido pelo processo de evapotranspiração. A evapotranspiração da planta depende da característica do clima e do tipo de cultura. Deve-se levar em consideração que a chuva constitui um aporte considerável de água nas regiões com altas precipitações, embora, em regiões áridas, esta quantidade seja

mínima. A necessidade hídrica do milho está torno de 500 a 800 mm/ciclo [DOORENBOS & KASSAM *apud* GHEYI et al, 1999].

3.3.1.2 Qualidade da água aplicada

A qualidade da água depende das condições climáticas locais, das características físicas e químicas do solo, da tolerância da cultura à salinidade, das práticas agronômicas (manejo do cultivo) e da técnica de irrigação empregada. A Tabela 3.5 apresenta alguns valores mínimos exigidos para a qualidade da água para a irrigação [USEPA, 1992].

Tabela 3.5 - Alguns parâmetros exigidos para a qualidade da água para irrigação.

Parâmetro	Qualidade da Água para a Irrigação
Ph	6,5-8,4
Sólidos Dissolvidos Totais	<2000
Nitrogênio Total	<30
Cloro	<350
Sódio	<70
Boro	<3

Fonte: adaptado de USEPA (1992).

Nota: (1) Todas as unidades em mg/L, exceto pH.

3.3.1.3 Freqüência de Irrigação

Para uma boa produtividade agrícola, a irrigação deve ser realizada antes que a umidade do solo alcance teores abaixo do valor mínimo, que corresponde ao potencial matricial crítico da cultura (Ψ_c); ou seja, valor acima do qual, a planta começa a perder produtividade devido ao esforço que tem para absorver a água do solo contra os esforços de absorção e capilaridade da água no solo. O potencial matricial crítico corresponde a uma umidade, denominada Umidade Crítica (UC), situada entre os valores de umidade correspondente à capacidade máxima de retenção de água no solo, denominada Capacidade de Campo (CC), acima da qual o líquido percola, ultrapassando a zona de raízes, e à umidade remanescente, quando ocorre, se mantém o Ponto de Murchamento (PM), ou seja, a murcha da planta.

Os valores de UC, CC e PM são obtidos na curva característica de água no solo. A capacidade de campo corresponde a um potencial matricial de -0,1 bar; o ponto de murchamento corresponde a um potencial matricial de 0,15 bar, e a umidade crítica varia em função do tipo de cultura escolhida; no caso do milho, varia entre -0,5 bar e -1,5 bar. As Figuras de B.1 a B.4, do Anexo B, apresentam as curvas características da água do solo para uma determinada área, onde foi adotado como potencial matricial crítico do milho o valor de -0,8 bar [SILVA, 2003].

Deste modo, para um metabolismo adequado da planta, deve-se controlar a umidade do solo para valores entre a UC e a CC. Quando a umidade do solo atinge valores próximos à umidade crítica, aplica-se um volume de irrigação correspondente à lâmina hídrica líquida (H_i), a qual é determinada em função de parâmetros característicos do solo e da cultura irrigada. Desta forma, restaura-se a umidade do solo para valores próximos à capacidade de campo. A Figura 3.4 ilustra uma irrigação que opera entre valores de umidade mínima e máxima para garantia do metabolismo da planta e que, em um dia, ultrapassa a umidade máxima, ou seja, lixívia uma certa quantidade de água no solo [SILVA, 2003].

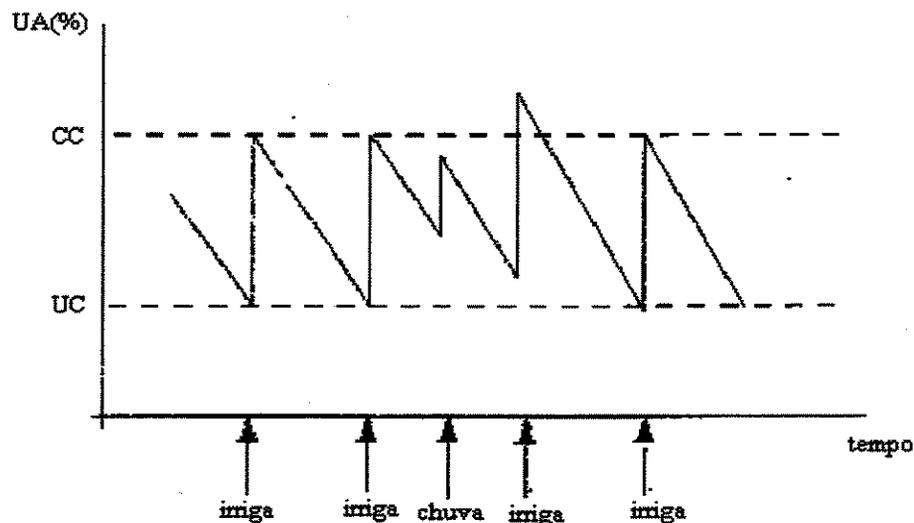


Figura 3.4 – Ilustração do controle de irrigação, havendo uma irrigação antecipada que teve como consequência a provável lixiviação do líquido. Fonte: (adaptado de SILVA, 2003).

3.3.1.4 Técnicas de Irrigação

As principais técnicas possíveis de irrigação com águas residuárias são: aspersão; inundação; sulcos; localizada (gotejamento e microaspersão) e subsuperficial (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Algumas técnicas de irrigação mais utilizadas para tratamento das águas residuárias.

Fonte: (adaptado de SILVA, 2003).

Para evitar entupimentos nos equipamentos, é necessário um tratamento simples para remoção de sólidos dos esgotos. Para irrigação por inundação ou por sulcos, não é necessário mais que um simples gradeamento para os sólidos grosseiros; a concentração de sólidos deve ser baixa, o que requer no mínimo uma decantação. No entanto, interessa correlacionar o grau de tratamento necessário e a técnica de irrigação empregada, em função do risco de transmissão de doenças [SILVA, 2003].

A irrigação por aspersão, para a saúde pública, é a mais perigosa; os aerossóis, contendo micróbios, podem ser transportados pelo vento à distância de mais de 1 km [FEACHEM et al, 1980; PEARSON, 1986]. Embora a distância mínima de 50 a 100 metros de estradas públicas e

residências seja suficiente como proteção a possíveis problemas reais à saúde [HESPANHOL, 1988], é prudente salientar, que as bactérias são mais infectivas quando inaladas do que quando ingeridas [FEACHEM et al, 1980] e, assim, trabalhadores do campo e moradores vizinhos podem ser infectados por inalação. Além de contaminar a área irrigada, contamina também folhas e frutos.

Nos métodos de irrigação subsuperficial, o contato direto com folhas e frutos pode ser evitado, e os riscos para o agricultor são também baixos. Porém, problemas de entupimento são freqüentes e pioram quando se aplicam águas residuárias. As obstruções são provocadas por partículas minerais, orgânicas e precipitados químicos. Essa técnica não oferece quaisquer riscos sanitários.

As vantagens e desvantagens de cada método de aplicação de águas residuárias são mostradas na Tabela 3.6 [SILVA, 2003].

3.3.1.5 Lixiviação

Uma quantidade de água maior que a lâmina hídrica requerida (H_i) pela planta é necessária para remover o excesso de sais acumulados na zona radicular com resultado da evapotranspiração do líquido irrigado. O controle da salinidade, com uma lixiviação efetiva na zona de raízes, torna-se mais importante quanto maior for a salinidade do líquido irrigado [PESCOD, 1992], e em regiões com precipitações atmosféricas abaixo de 700 mm/ano [SILVA, 2003].

3.3.1.6 Drenagem

Definida como a remoção do excesso de água da zona radicular de modo a permitir o metabolismo adequado da planta. É importante em regiões com o lençol freático superficial, onde o transporte de sais até a superfície pode ocorrer por capilaridade e, em seguida, concentrar-se pela evaporação, ocorrendo a clomatação do solo [GHEYI et al, 1999]. O emprego de irrigação

em solos argilo-siltosos pode ter um bom resultado, pois possuem boa drenagem [CAMPOS, 1999].

Tabela 3.6 - Fatores que afetam a seleção da técnica de irrigação e medidas necessárias quando se utilizam águas residuárias.

Técnica de Irrigação	Fatores que afetam a seleção	Medidas especiais para águas residuárias
Irrigação por inundação	Custo mínimo de implantação, não requer a sistematização do terreno	Proteção completa para os trabalhadores do campo, para os que manipulam as colheitas e os consumidores
Irrigação por sulcos	Custo reduzido, geralmente precisa do nivelamento do terreno	Proteção para os trabalhadores do campo e, às vezes para os que manipulam as colheitas e para os consumidores
Irrigação por aspersão	Aproveitamento médio da água não requer a sistematização do terreno	Não devem ser cultivados alguns produtos da categoria B ¹ , sobretudo frutíferas. A distância mínima é de 50 a 100m para vilas e estradas. Não devem ser utilizados resíduos anaeróbios, devido ao mau odor.
Irrigação subsuperficial ou localizada	Custo elevado, maior aproveitamento de água e colheitas com maiores produtividades	Deve-se filtrar a água para evitar problemas de entupimentos nos emissores

Nota: (1) Categoria B: Neste grupo, os trabalhadores do campo são também o primeiro grupo de risco, porém podem existir riscos indiretos para o consumidor. Nesta categoria, incluem-se: cultivos, pastagens e forrageiras consumidas verdes; cultivo cujo produto para o consumo humano não entre em contato direto com as águas residuárias; cultivos cujos produtos sejam ingeridos cozidos; cultivos cujos produtos sejam consumidos após serem descascados; qualquer cultivo irrigado por aspersão (vide Tabela 3.2).

Fonte: adaptado de GHEYI et al, 1999.

3.3.2 Ciclo Vegetativo das Plantas

A maior parcela de água necessária para a planta depende basicamente da demanda evaporativa atmosférica [VIEIRA, 1999]. Entretanto, há os períodos críticos do seu ciclo vegetativo nos quais a demanda de água pela planta é maior, o não fornecimento de água necessária nestes períodos pode comprometer a produção de toda uma safra.

O ciclo vegetativo, ou fenológico é caracterizado pelos seguintes estágios [VIEIRA, 1999]:

3.3.2.1 Estágio Inicial

Vai da sementeira até a germinação completa. Em uma cultura irrigada é conveniente a irrigação de pré-semeadura, a fim de proporcionar condições de umidade necessárias para induzir o processo de germinação das sementes. Desse modo, é possível a obtenção de mais de uma safra de uma cultura no mesmo ano.

No estágio inicial deve ser mantida uma profundidade de irrigação de 20cm, de forma a fornecer o mínimo de água necessária para o processo de germinação [RESENDE *apud* BÜLL, 1993].

3.3.2.2 Estágio de Desenvolvimento

Vai da germinação completa até o início da floração. Refere-se ao período de crescimento vegetativo da planta, em que a manutenção da umidade requerida pelo solo deve ser mantida para garantir uma planta vigorosa.

3.3.2.3 Estágio Intermediário

Vai da floração até o início do amadurecimento. A floração inicia-se quando a planta emite sua brotação e conseqüentemente emissão de botões florais. Nesta fase, a irrigação deve ser conduzida com a maior precisão possível, pois qualquer deficiência na aplicação pode comprometer todo o processo. Neste estágio, ocorrem a inflorescência masculina (pendão) e a inflorescência feminina (espiga) no milho.

3.3.2.4 Estágio da Maturação

A identificação da maturação varia de acordo com a espécie vegetal. No caso do milho, corresponde ao estágio em que a inserção do grão na espiga está necrosada, apresentando uma coloração preta. O fluxo da seiva para a espiga é interrompido, não sendo mais necessária à irrigação do cultivo.

É a fase em que o fruto seja grão, tubérculo ou fruta, adquire as melhores condições de tamanho, cor, aroma, consistência e sabor.

3.3.2.5 Estágio Final

Vai da maturação completa até a colheita. Nesta fase, não se irriga, sendo necessária uma estiagem para que o produto atinja as condições ideais de umidade para a colheita.

A duração de cada safra depende da variedade, clima, época do ano e de dados locais, devendo, ser consultada uma literatura a respeito [VIEIRA, 1999].

Ao longo do ciclo, a demanda hídrica da planta varia. Para controlar adequadamente o fornecimento de água para a planta, ou seja, de quando se deve irrigar, é utilizado o fator denominado coeficiente de demanda hídrica da cultura, que varia de acordo com o estágio em que a planta se encontra, alterando seus valores inclusive dentro do estágio [SILVA, 2003]. A Figura 3.9 ilustra a variação do coeficiente de demanda hídrica do milho (kc) ao longo do ciclo vegetativo, observa-se uma queda da necessidade hídrica da cultura após o estágio de desenvolvimento.

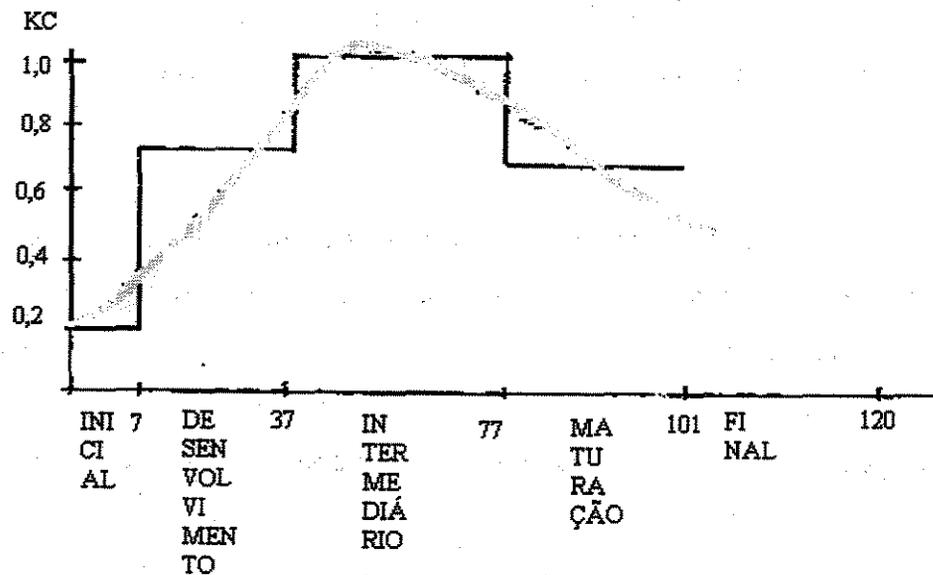


Figura 3.6 – Relação do coeficiente de demanda hídrica do milho (kc) com os dias de duração do ciclo vegetativo. Fonte: (adaptado de SILVA, 2003).

3.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

Em 1895, Roentgen, descobriu uma nova espécie de radiação que ele denominou de raios X e, Moseley, em 1913, estabeleceu as bases analíticas espectral de raios X, relacionando o comprimento de onda, linhas características com os números atômicos dos elementos. Desde então, a Fluorescência de Raios X (XRF – *X-Ray Fluorescence*) desenvolveu-se como um processo analítico [KLOCKENKÄMPER et al, 1992].

A análise por fluorescência de raios X se baseia na medida das intensidades dos raios X emitidos pelos elementos químicos presentes nas amostras, quando estas são devidamente excitadas [SIMABUCO, 1993].

A XRF, até 1966, era realizada por espectrômetros com dispersão por comprimento de onda (WD-XRF – *Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence*), baseados na lei de Bragg, que necessitam de um tubo de raio X de alta potência na excitação e, na detecção, de um movimento sincronizado e preciso entre o cristal difrator e o detector (a gás ou cintilador sólido) [SIMABUCO, 1993].

Com o desenvolvimento do detector semicondutor de Si(Li), capaz de discriminar raios X de energias próximas, surgiu a fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF, *Energy Dispersive X-Ray Fluorescence*), conhecida como fluorescência de raios X não dispersiva, mais prática, com instrumentação menos dispendiosa, pois pode utilizar tubos de raios X de baixa potência e fontes radioativas na excitação [SIMABUCO, 1993].

Uma variante da fluorescência de raios X por dispersão de energia, denominada de Fluorescência de raios X por Reflexão Total (TXRF – *Total Reflexion X-Ray Fluorescence*), tem se desenvolvido muito nos últimos anos e tem sido aplicado principalmente na análise de elementos traço, na faixa de nanogramas ou ppb, em amostras líquidas da ordem de microlitros, e em pesquisas ligadas ao monitoramento ambiental, em amostras biológicas, medicinais e industriais, entre outras [SIMABUCO e MATSUMOTO, 2001].

Ao contrário da XRF, que utiliza o feixe da radiação incidindo na amostra com um ângulo em torno de 45°, a TXRF utiliza um feixe com um ângulo de incidência menor que 0,1°. A TXRF difere da XRF, em relação ao tipo e preparo da amostra, calibração, análise de dados e limites de detecção [KLOCKENKÄMPER et al, 1992].

A técnica de TXRF pode ser aplicada para materiais sólidos; solo, sedimento, filtros de ar, materiais particulados, e outros, devendo ser antecedida de digestão química e/ou diluição apropriada, como as utilizadas em fotometria de chama, espectrometria, absorção/emissão atômica (AES) e suas variantes (ICP-AES, ICP-MS), e para este tipo de amostra apresenta a vantagem de necessitar de diminutas quantidades para a digestão [KOOPMANN e PRANCHE, 1992].

Os efeitos de absorção e reforço, comuns na WD e ED-XRF, não ocorrem na TXRF, pois são utilizadas massas pequenas de amostras, que depositadas em um suporte, formam um filme fino. Portanto, não é necessário, efetuar correções para o efeito matriz, e desta forma, na análise quantitativa, pode ser estabelecido uma regressão linear entre a intensidade dos raios X e a concentração dos elementos.

As análises de amostras sólidas por TXRF, geralmente, são realizadas após a digestão com ácidos [SCHWENKE e KNOTH, 1993], com limites de detecção abaixo de ppm [AINGINGER et al, 1995].

Os sistemas de dispersão por energia empregam detectores de alta resolução, capazes de produzir pulsos eletrônicos proporcionais às energias dos raios X, sendo o mais empregado o detector de Si(Li), e algumas vezes o de Germânio hiperpuro. A escolha dos detectores semicondutores deve ser feita em função da faixa de energia de interesse, sendo, normalmente, o primeiro utilizado na faixa de 1 a 30 keV, e o segundo acima de 30 keV, por apresentar uma maior eficiência de detecção [SIMABUCO, 1993].

Caso o parâmetro seja o número atômico, o detector de Si(Li) é empregado na detecção de raios X K emitidos pelos elementos de número atômico na faixa de 13 (Al) a 50 (Sn) e raios X L dos elementos pesados. Devido à sua baixa eficiência para os raios X de baixa energia, não são aconselháveis na detecção dos raios X emitidos por elementos leves, ou seja, de número atômico menor que 13. Para os raios X de alta energia, emitidos pelos elementos de número atômico alto ($Z > 50$) é mais aconselhável o uso do detector de Ge(Li), devido a sua maior eficiência nesta região em relação ao detector de Si(Li) [SIMABUCO, 1993].

Pesquisadores da Universidade da Antuérpia, na Bélgica, desenvolveram um *software* para o ajuste dos espectros de raios X chamado de QXAS (*Quantitative X-ray Analysis System*) [VAN ESPEN, 1977].

Os parâmetros do ajuste se referem à área, posição e largura das funções, que são basicamente gaussianas e que descrevem os picos característicos e a função do modelo do

background. Após o término do ajuste do espectro de raios X, o programa fornece um relatório contendo as informações referentes à energia, área líquida do pico, e os desvios padrões, para cada linha característica dos elementos selecionados no espectro de pulsos.

Dependendo da complexidade do modelo e do algoritmo empregado para otimizar os parâmetros, as intensidades espectrais são obtidas com precisão diferente. Um destes algoritmos é descrito por MARGUARD e foi utilizado na elaboração do *software* QXAS [JANSSENS et al, 1994].

3.4.1 ANÁLISE QUANTITATIVA

Para a análise quantitativa, normalmente uma alíquota de 5 a 50 μL da amostra “*in natura*” ou digerida é colocada no centro de um suporte de quartzo ou germânio e seca. O filme fino obtido, com massa entre picogramas a 10 microgramas, cobrindo um círculo com aproximadamente 5 mm de diâmetro, está pronto para ser analisado por TXRF.

Quando a amostra contiver elementos voláteis, como mercúrio e arsênio, estes devem ser convertidos em formas químicas mais estáveis pela adição de uma pequena quantidade de uma solução de um agente quelante, como, por exemplo, ditiocarbamato de pirrolidina de amônia (APDC), colocada na superfície do suporte da amostra antes da evaporação do solvente [SIMABUCO e NASCIMENTO FILHO, 1994].

Portanto, devido à diminuta espessura da amostra e alta energia dos raios X normalmente utilizados na excitação, não há a ocorrência do efeito de absorção e reforço na TXRF, e conseqüentemente, a correção para o efeito matriz não é necessária.

Desse modo, a equação básica para análise quantitativa é a relação entre a intensidade fluorescente da linha característica K_{α} e a concentração de um elemento de interesse, que pode ser escrita na forma:

$$I_i = s_i \cdot C_i \quad (3.1)$$

Onde:

I_i = representa a intensidade líquida (cps) da linha característica K_{α} emitida;

C_i = concentração (ppm ou $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) na solução pipetada no suporte;

s_i = sensibilidade elementar do sistema (cps/ppm) para o elemento de interesse i .

Na ED-XRF convencional, a determinação da sensibilidade elementar pode ser realizada pela medida da intensidade dos raios X característicos emitidos por um elemento contido em uma amostra-padrão de espessura fina e contendo esse único elemento, e neste caso os efeitos de absorção e de reforço são desprezíveis.

Pode-se também, a partir de elementos e compostos puros, confeccionar em laboratório amostras-padrão, de concentração e espessura conhecidas, e neste caso, deve-se levar em conta as correções para os efeitos de absorção e reforço.

No caso da TXRF, a amostra normalmente é ultrafina e os efeitos de matriz são considerados desprezíveis. Assim, esta técnica apresenta a grande vantagem de permitir a determinação simultânea da sensibilidade elementar para vários elementos, utilizando-se uma solução padrão multielementar, contendo esses elementos em baixa concentração (na faixa de ppm) e emissores de raios X de energias não muito próximas, a fim de se evitar a ocorrência da sobreposição de picos.

Além disso, na TXRF é possível adicionar um padrão interno à amostra e neste caso tem-se a vantagem de corrigir as instabilidades do sistema, como flutuações no gerador de raios X, ou na corrente e fluxo de fótons da radiação síncrotron, emissão dos raios X emitidos pelo anodo, detecção dos raios X, e erros operacionais, como pipetagem, posicionamento das amostras, etc.

Os elementos a serem utilizados como padrões internos não devem estar presentes e/ou devem ocorrer em concentrações baixíssimas nas amostras. Os elementos Ge e Ga têm sido utilizados para amostras de águas, e o Co e Y para outros tipos de amostras. A função do padrão interno é eliminar o efeito de geometria, porque o filme fino formado sobre o suporte não possui geometria regular. Desta forma, a contagem obtida na irradiação da amostra depende da posição em que esta for colocada no suporte. Com a adição do padrão interno, o resultado obtido será sempre em relação a este padrão, não importando a posição da amostra (LADISICH et al, 1994; KLOCKENKÄMPER e BOHLEN, 1996).

Utilizando a equação (3.1) podemos fazer a razão entre a intensidade do elemento i e o padrão interno Y .

$$\frac{I_i}{I_y} = \frac{s_i}{s_y} \frac{C_i}{C_y} \quad (3.2)$$

$$\frac{I_i}{I_y} C_y = \frac{s_i}{s_y} C_i \quad (3.3)$$

Fazendo

$$R_i = \frac{I_i}{I_y} C_y \quad S_R = \frac{s_i}{s_y} \quad (3.4)$$

$$R_i = S_R \cdot C_i \quad (3.5)$$

Onde:

R_i = contagem relativa para o elemento i na amostra.

I_i = intensidade do elemento i na amostra.

C_i = concentração do elemento i na amostra.

I_Y = intensidade do padrão interno (y) na amostra.

C_Y = concentração do padrão interno (y) na amostra.

s_i = sensibilidade do detector para o elemento i .

s_Y = sensibilidade do detector para o padrão interno y .

S_R = sensibilidade relativa (adimensional) para o elemento i .

O coeficiente angular (S_R) da reta, no gráfico R_i versus C_i , representa a sensibilidade relativa do elemento i .

Com isto, pode-se calcular a concentração do elemento de interesse, utilizando-se a equação:

$$C_i = \frac{I_i}{I_y} \cdot S_R \cdot C_y \quad (3.6)$$

Desse modo, a correção para efeito matriz, tão trabalhosa na ED- e na WD-XRF, são minimizadas na TXRF.

Vale a pena ressaltar que existe uma alta correlação matemática entre a sensibilidade relativa e o número atômico dos elementos. Assim, com base nas sensibilidades relativas calculadas para os elementos contidos na solução padrão multielementar, pode-se estimar a sensibilidade para um elemento detectado na amostra, mas, não contido na solução padrão e conseqüentemente estimar a sua concentração na amostra de interesse. De maneira análoga, as mesmas equações podem ser utilizadas para a linha K_β e outras, como L e M, onde logicamente as sensibilidades relativas terão outros valores.

Em um espectro de pulsos de raios X pode-se observar uma linha aproximadamente contínua sob os picos característicos dos elementos que compõe a amostra. Esta linha decorre principalmente das interações das radiações espalhadas pela amostra com o detector, e também das próprias radiações características emitidas pelos elementos.

Assim, em cada pico no espectro de pulsos há uma área devida em parte à intensidade dos raios X característicos (denominada intensidade líquida) de um elemento i e em parte ao *continuum* ou *background* (BG) naquela região i .

O limite de detecção LD_i (cps) para cada elemento i está diretamente relacionado com a intensidade do BG_i (cps) sob o pico desse elemento de acordo com a equação:

$$LD_i(\text{cps}) = 3 \cdot \sqrt{BG_i} \quad (3.7)$$

Este limite pode ser expresso como uma concentração elementar (ppm) que resulta em uma intensidade líquida igual a 3 vezes a intensidade do **BG** (cps):

$$LD_i(\text{ppm}) = \frac{3 \cdot \sqrt{BG_i}}{S_R} \quad (3.8)$$

Onde, S_R representa a sensibilidade relativa, definida anteriormente na equação (3.4).

De modo geral, os limites de detecção para a técnica de TXRF são bem menores que aqueles da fluorescência convencional ED-XRF, devido principalmente a três fatores:

- baixa intensidade do *continuum*, devido a reduzida transferência de energia ao suporte da amostra em relação à ED-XRF;
- o fluxo da radiação primária disponível para a excitação da amostra, devido ao feixe refletido, é muito mais efetivo do que na XRF;
- a distância entre a amostra (filme fino) e o detector de Si é muito maior que na ED-XRF, aumentando portanto a eficiência de detecção dos raios X característicos.

Os dois últimos fatores fazem com que a sensibilidade elementar tenha valores superiores àqueles da ED-XRF, e juntamente com *continuum* inferiores, resulta em limites de detecção mais satisfatórios para a TXRF.

Para realizar a calibração do sistema de detecção, e posteriormente ser possível calcular a sensibilidade relativa, são preparadas soluções padrão contendo o elemento Gálio (Ga), neste caso utilizado como padrão interno.

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO

A pesquisa foi desenvolvida em uma área experimental, junto a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Graminha, localizada no bairro da Graminha, no município de Limeira, SP. Latitude 23°34,990' e longitude 47°26,159'; operada pela empresa "Águas de Limeira S.A." (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3), despeja no Ribeirão da Graminha, pertence à Bacia do Rio Piracicaba (Figura A.1 do Anexo A).

4.2 ORGANIZAÇÃO DO PROJETO

O efluente aplicado no sistema de irrigação era proveniente de um conjunto de quatro filtros anaeróbios de fluxo ascendente com capacidade individual de 500 L e tendo, em seu interior, recheio de anéis de bambu para a fixação do biofilme celular (Edital 1, tema 2, PROSAB). Estes reatores encontram-se instalados na ETE Graminha, conforme apresentado na Figura 4.4. Foram realizados estudos avaliando o desempenho deste reator em tempos de detenção variados [CAMARGO, 2000]. Ao longo do projeto de irrigação, reatores foram operados com o tempo de detenção de 3 horas, a fim de atender a quantidade de efluente necessária para satisfazer a demanda hídrica da cultura [SILVA, 2003].



Figura 4.1 – Área do projeto



Figura 4.2 – Entrada do ETE da Graminha

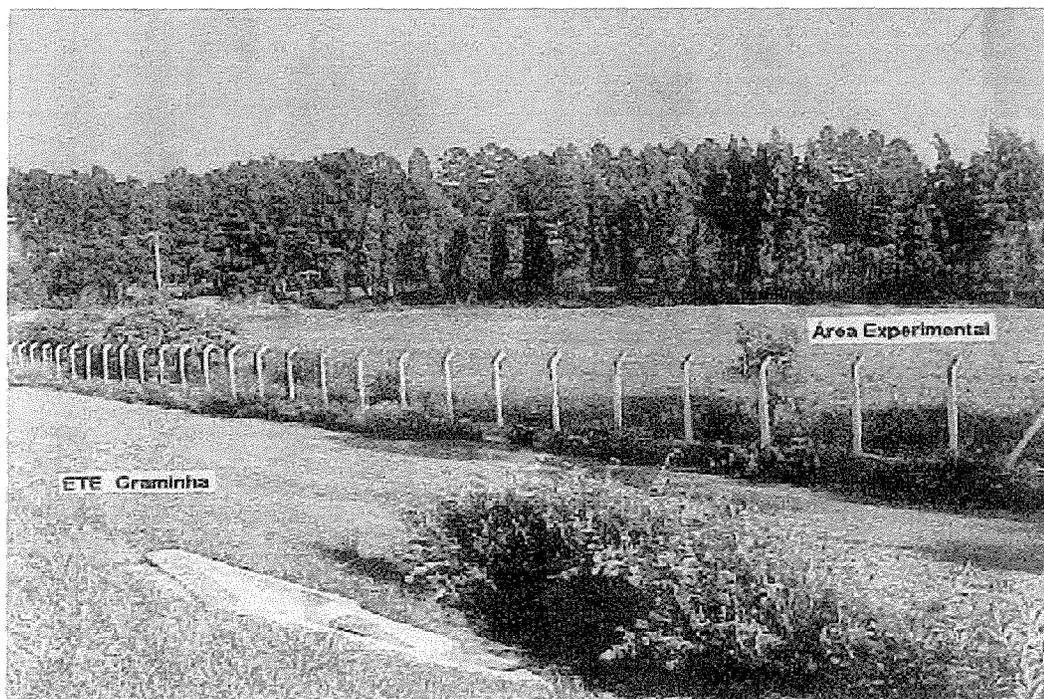


Figura 4.3 – Terreno adjacente a ETE Graminha, Limeira, SP, onde foi instalado o sistema de irrigação (solo natural).

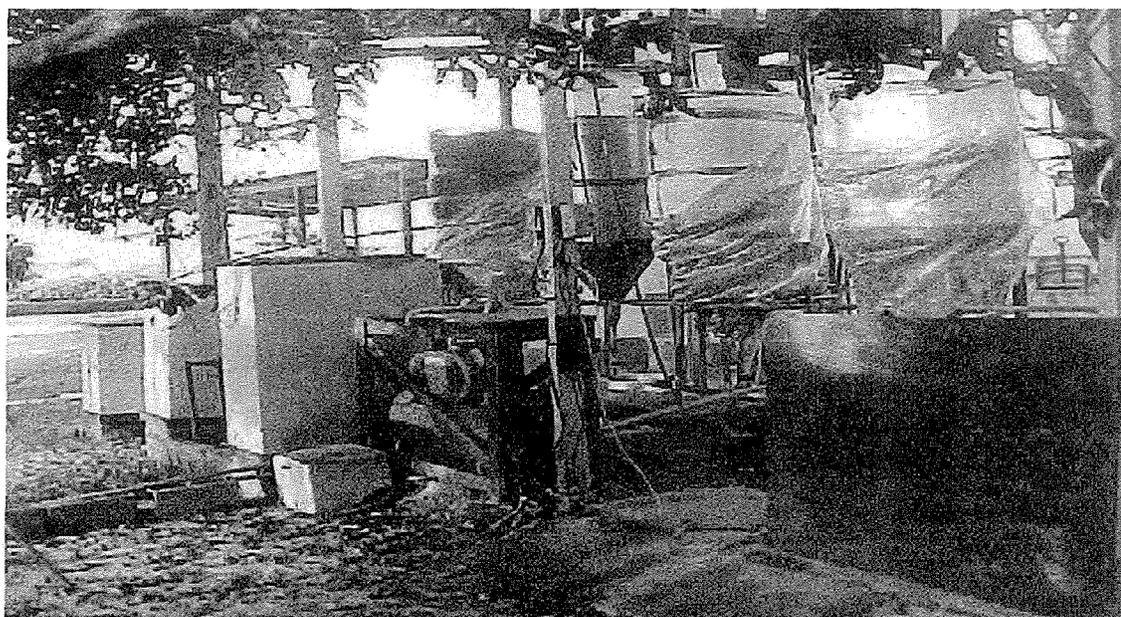


Figura 4.4 – Filtros Anaeróbios UASB instalados no interior das dependências da ETE Graminha, Cia Águas de Limeira S.A., Limeira, SP.

4.3 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

4.3.1 Ensaios Preliminares

Para caracterização e dimensionamento do projeto de irrigação foram realizados ensaios físicos e químicos do solo, e também o levantamento topográfico da área. Foram coletadas amostras de solo em diferentes profundidades, 0–25 cm; 25–50 cm; 50–75 cm; 75–100 cm; depois de coletadas foram encaminhadas ao Laboratório de Hidrologia da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP. As amostras de solo foram coletadas em três pontos representativos do terreno, onde foram implantadas as três repetições do experimento.

O ensaio de densidade global, ou peso específico aparente foi realizado com o auxílio do amostrador de Uhland. No laboratório, esta amostra foi transferida para um cilindro de volume e tara conhecidos. Colocou-se este conjunto em estufa a 110°C por 24 horas, e foi feita a leitura do peso seco do solo. Calculou-se a densidade global com a diferença entre o peso seco e a tara, divididos pelo volume conhecido do recipiente de alumínio, Equação 4.1.

$$Dg = \frac{(PS - T)}{V} \quad (4.1)$$

Onde:

Dg – densidade global do solo (g/cm³)

PS – peso seco (g)

T – Tara, correspondente ao peso do recipiente de alumínio (g)

V – volume do recipiente de alumínio

O levantamento da curva granulométrica foi realizado pela análise granulométrica conjunta, a qual é composta de duas fases de ensaio que são: peneiramento e sedimentação.

A determinação da curva característica para cada camada de solo foi realizada pela aplicação de pressões entre 0,1 bar (Capacidade de Campo) e 15 bar (Ponto de Murchamento) no Extrator de Richards. Foram levantadas curvas características do solo para as camadas de 0 a 25 cm, de 25 a 50 cm, de 50 a 75 cm, e de 75 a 100 cm.

O levantamento topográfico da área experimental foi realizado com equipamento GPS, identificando todas as singularidades existentes na área, bem como o nível d'água dos córregos e rios adjacentes à área de plantio antes da implantação do projeto, em setembro de 2000. A Figura A.2, no Anexo A, apresenta o levantamento topográfico realizado na área experimental. Tal levantamento, junto com o estudo do sentido do lençol freático (Figura A.3), serviu de base para definir a melhor posição de implantação do sistema.

4.3.2 Preparo do Solo

Finalizados os ensaios preliminares, inicia-se o preparo do solo para o cultivo. Foram realizados os serviços de aração e gradeamento mecanizado do solo, conforme apresenta a Figura 4.5. A correção do solo com calcário (Figura 4.6) foi realizada com um período de descanso superior a 60 dias [RAIJ et al, 1996].

4.3.3 Estrutura do Projeto

O sistema de irrigação foi implantado em cenários, os quais correspondem à unidade experimental do sistema. Cada cenário era formado por quatro sulcos, com cinco linhas de plantio, sendo que duas eram bordaduras, Figura 4.7 e 4.8. O nivelamento foi feito com nível de pedreiro sobre régua de 4m de comprimento. A largura do sulco, de 20 cm, teve como referência a largura do enxadão.

Foram aplicadas diferentes lâminas hídricas (Hi) de irrigação com efluente anaeróbio, correspondentes as profundidades de irrigação de 20 cm, 40 cm e 60 cm. A profundidade de

irrigação corresponde à profundidade do perfil do solo que se deseja irrigar. Esses valores foram estabelecidos em função do cultivo, sendo recomendada para o milho, uma profundidade de irrigação 40 cm.

Para avaliar a produtividade agrônômica do projeto e a absorção e/ou transferência de metais no cenário efluente, implantou-se o cenário água (branco), com profundidades de irrigação distintas (20 cm, 40 cm e 60 cm), solo enriquecido com nutrientes [RAIJ et al, 1996], e água potável.

O conjunto do cenário efluente e do cenário água, com a mesma profundidade formam um bloco. Foram implantados três blocos (Figura 4.9 e 4.10).

Para a aplicação do efluente e da água nos em seus respectivos cenários, foi instalado um sistema de distribuição composto por 6 tambores, e para cada cenário, com volumes de 60 L, 120 L e 180 L, correspondentes aos volumes necessários para irrigar um sulco referente às profundidades de irrigação de 20 cm, 40 cm e 60 cm, respectivamente, Figura 4.11. O cálculo do volume aplicado para cada profundidade de irrigação por sulco será apresentado no item 4.4.2.

A distribuição do líquido nos sulco foi feita com mangueira que eram colocadas dentro de cada sulco, buscando obter uma melhor uniformidade possível nesta operação. Como os sulcos foram implantados em nível, não houveram problemas relacionados com a irrigação privilegiada por parte do sulco, como poderia ocorrer com os primeiros metros de um sulco em declive. A irrigação de um sulco é demonstrada na Figura 4.12.



Figura 4.5 – Aspecto do solo após aração e gradeamento



Figura 4.6 – Aplicação de calcário agrícola na área de instalação do experimento.



Figura 4.7 – Implantação de um cenário

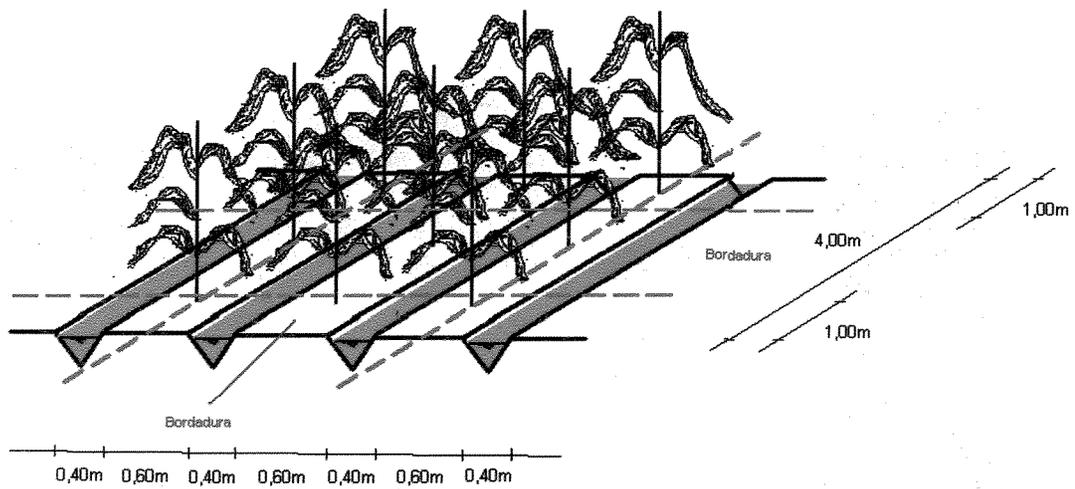


Figura 4.8 – Esquema de um cenário, com identificação das linhas de bordadura e da seção dos sulcos.

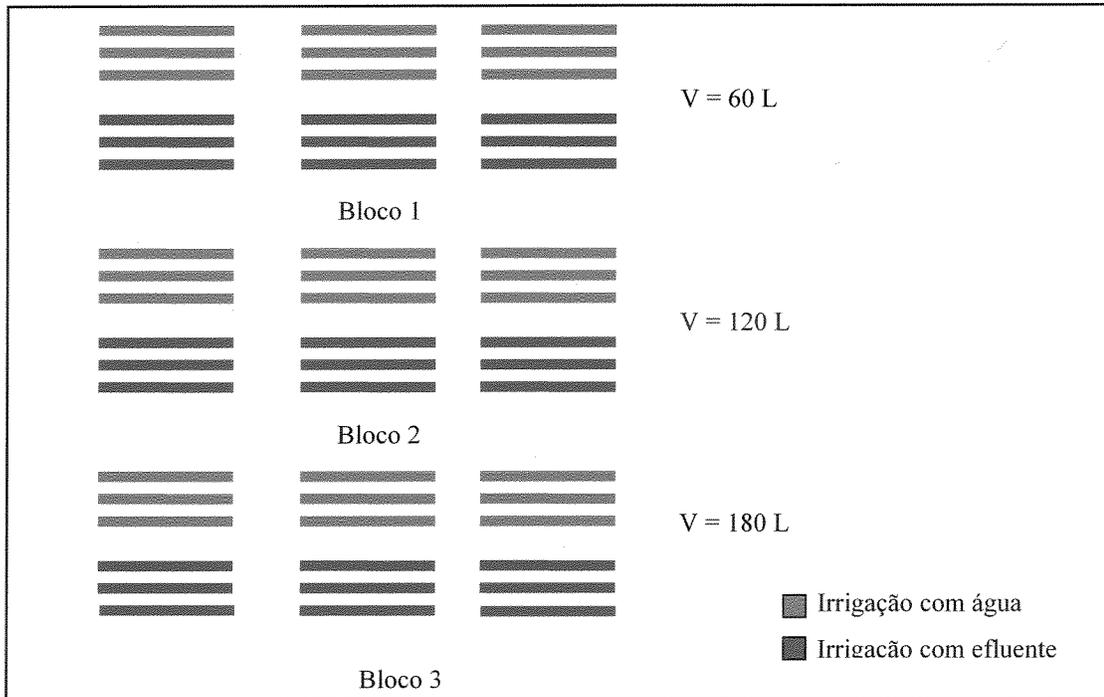


Figura 4.9 – Esquema do projeto com cada bloco e seus respectivos cenários, com o tipo de tratamento, irrigação com água e efluente, e os diferentes volumes de aplicação (V).



Figura 4.10 - Bloco implantado na área experimental.

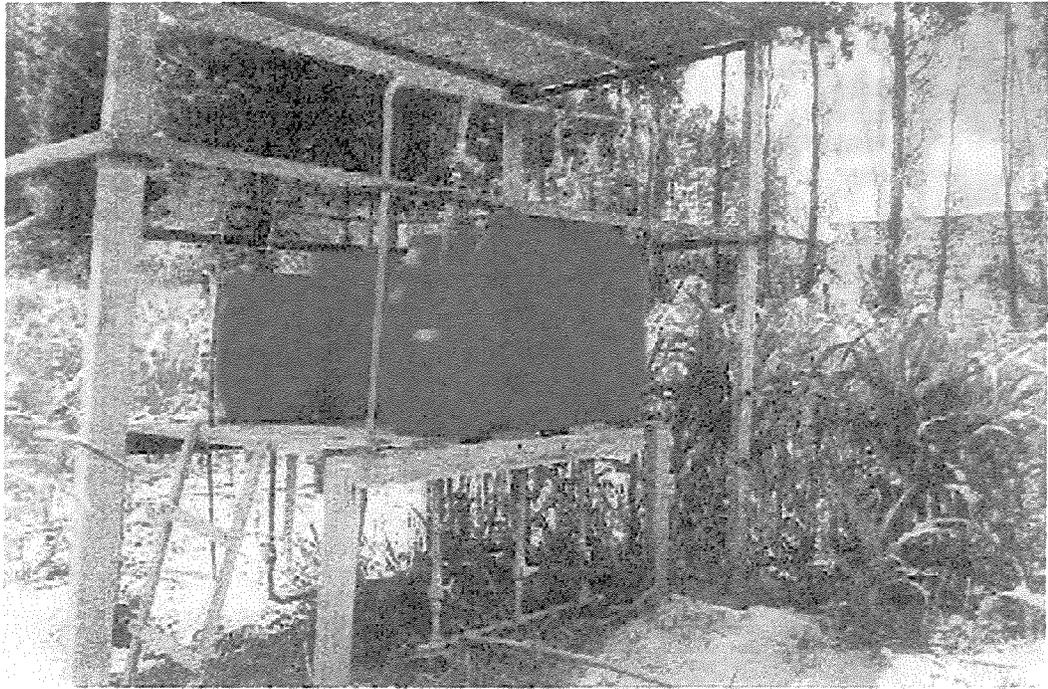


Figura 4.11 – Sistema de distribuição do efluente e da água instalado na área experimental.



Figura 4.12 – Aplicação do sistema de irrigação por sulcos.

4.3.4 Plantio

Com o solo preparado e o sistema de irrigação instalado, prosseguiu-se com o processo de adubação do solo e plantio do milho. A adubação com fertilizante químico foi realizada, somente, nos cenários água, nos cenários efluente, foi utilizado solo natural. O plantio foi feito com a utilização de uma matraca a cada 20 cm, Figura 4.13.

Os cenários irrigados com água sofreram adubação química com a taxa de 40 g/m linear, tendo como base o ensaio de fertilidade. Os cenários irrigados com efluente não foram adubados.

Foi utilizada a variedade AG-405, Agrocere, correspondente a um milho híbrido, de ciclo precoce, tolerante à seca e às principais doenças, com altura de 2,40 m e altura da espiga 1,40 m. Tendo como finalidade a produção de grãos e a silagem, podendo ser plantado em todas as épocas (cedo, normal, tarde e safrinha), conforme a especificação técnica da empresa produtora das sementes. Tal variedade de milho já foi empregada no tratamento de efluentes e obtidos bons resultados (SILVA, 2003).



Figura 4.13 - Plantio do milho, realizado com matraca, ao longo dos cenários.

4.4 OPERAÇÃO DO SISTEMA

4.4.1 Controle de Irrigação

Para o controle da frequência de irrigação, ou manejo da irrigação, foram propostos o método gravimétrico e o método baseado no tanque classe A. O manejo da irrigação baseia-se em um princípio simples: o da máxima produtividade agrícola, com a água necessária para planta. Trabalha-se, portanto, com a capacidade de campo (CC), ou capacidade máxima de retenção de água no solo, acima da qual o líquido lixivia para o lençol, e com a umidade crítica, referente ao potencial matricial crítico da planta, abaixo da qual a planta tem que realizar esforços que comprometam seu metabolismo.

4.4.1.1 Método Gravimétrico

O controle da umidade atual (UA) baseia-se no ensaio de umidade do solo, no qual calcula-se o peso úmido (PU), coloca-se a amostra em estufa a 105° por aproximadamente 24 horas e, posteriormente, calcula-se o peso seco (PS) e o peso recipiente (T); obtendo-se, a umidade atual (Equação 4.2).

$$UA(\%) = \frac{PU - PS}{PS - T} \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

UA – umidade atual (%)

PU – peso úmido (g)

PS – peso seco (g)

T – peso correspondente à cápsula de alumínio (g)

Quando a UA atinge o valor da UC, irrigam-se os sulcos referentes a esta profundidade de irrigação com lâmina hídrica correspondente, retornando a umidade do solo à capacidade de campo.

O método gravimétrico é o mais adequado para pesquisas e que apresenta resultados reais de campo [VIEIRA, 1999].

4.4.1.2 Método do Tanque Classe A – Controle Diário

O controle da umidade pelo tanque classe A, é um controle diário que tem com base o balanço hídrico de precipitação, evaporação e quantidade de água demandada pela cultura [VIEIRA, 1999].

O método requer a instalação de um pluviômetro e de um tanque classe A (evaporímetro). O pluviômetro, cedido pelo Laboratório de Hidrologia da Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, foi implantado nas instalações da ETE Graminha e foi controlado diariamente pelo operador da estação. O tanque classe A encontra-se instalado no CESET, situado no campus da UNICAMP em Limeira, SP, próximo à área, cerca de 10 km, e é controlado diariamente por uma equipe de funcionários da Instituição. Comparando os dados pluviométricos coletados na área experimental e os dados coletados no CESET, ao lado do tanque classe A, observa-se uma diferença significativa nos índices pluviométricos somente nos períodos de seca.

O balanço hídrico realizado pelo tanque classe A requer os seguintes dados iniciais: UA, UC, Dg, PM, kc (coeficiente de demanda hídrica da cultura) e kp (coeficiente do tanque). Diariamente devem ser inseridos os dados de evaporação e precipitação. Esse controle pode ser feito por uma série de 15 dias. Em duas situações o controle deve ser interrompido e reiniciado: quando ocorre o transbordo do tanque classe A, pois é perdido o dado de evaporação do dia, e quando muda o estágio do ciclo vegetativo, pois altera o coeficiente de demanda hídrica da cultura (kc).

A planilha utilizada no controle diário foi desenvolvida pelo técnico do COTIL/UNICAMP, Luiz Fernando Chang de Oliveira, e apresenta valores como: lâmina

necessária para a restituição da CC, umidade armazenada no solo, déficit hídrico acumulado e um gráfico do controle diário do período. Quando a lâmina necessária for igual a lâmina hídrica (H_i), irriga-se (SILVA, 2003).

No método gravimétrico, irriga-se sempre que UA for igual à UC. Entretanto, na definição do dia de irrigação, prevalece o método do tanque classe A, caso o mesmo esteja bem ajustado. Para conferir a precisão do resultado obtido por este método, verifica-se a umidade do solo pelo método gravimétrico. Caso não corresponda ao mesmo valor obtido pelo controle diário, altera-se o valor de k_c de modo a balizar este método.

4.4.2 Lâmina de Aplicação e Volume de Irrigação

As lâminas de aplicação foram calculadas para as profundidades de irrigação de 20 cm, 40 cm e 60 cm (Equação 4.3).

$$H_i = \frac{(CC - UC_0)}{10} \times Dg \times h \quad (4.3)$$

onde:

H_i – Lâmina Hídrica Líquida (mm)

CC – Capacidade de Campo (%)

UC – Umidade Crítica (%)

Dg – Densidade Global (g/cm^3)

h – Profundidade de Irrigação (cm)

Para o cálculo do volume aplicado por sulco para cada profundidade de irrigação, utilizou-se a área de influência do sulco, 4,0 m de comprimento por 1,0 m de largura, como mostra a Figura 4.14. O volume foi calculado pela Equação 4.4, com as devidas transformações de unidades.

$$V = 1,05 \times A_i \times H_i \quad (4.4)$$

onde:

V – Volume aplicado por sulco (L)

A_i – Área de influência de um sulco (m^2)

H_i – Lâmina Hídrica Líquida (mm)

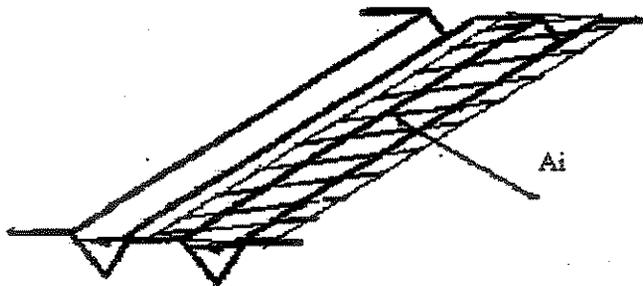


Figura 4.14 – Ilustração da área de influência (A_i) de um sulco de infiltração no cenário.

4.5 ANÁLISE AGRONÔMICA

Os aspectos agronômicos resultantes da aplicação do efluente anaeróbio na irrigação foram avaliados pela produtividade da cultura de milho irrigada e pela fertilidade do solo. O cenário água foi utilizado como um branco a fim de comparar o desempenho do cenário efluente.

4.5.1 Produtividade Agrícola

O método utilizado para obtenção da produtividade pela Biomassa dos grãos a $60^{\circ}C$ refere-se ao peso de grãos secos por unidade de área, expresso em kg/ha [SILVA, 2003].

Foram colhidas as espigas da região mais produtiva do cenário, área de 2 m x 2 m no centro do cenário, em seguida colocadas em estufas a 0°C até que a diferença entre as duas pesagens sucessivas de uma espiga do cenário seja nula, não havendo mais redução de seu peso. Este processo de secagem dura cerca de 15 dias.

Após a secagem dos grãos, debulham-se as espigas do cenário para pesagem. Dividindo-se o peso obtido pela área de 4 m², obtém-se o resultado da biomassa expresso em kg/m², conforme a Equação 4.5. Converte-se esse valor para kg/ha, de modo a obter-se um comparativo com outros experimentos.

O inconveniente dessa metodologia, é que a biomassa obtida não pode ser relacionada a uma umidade específica.

$$Pr od = \frac{gs}{A} \quad (4.5)$$

Onde:

gs = peso seco (kg)

A = área (m²)

4.6 ANÁLISE DE METAIS

4.6.1 Preparação das Amostras e Padrões

Foram coletadas amostras de folhas e espigas dos cenários de plantio, seguindo a metodologia:

1. Escolheu-se um pé de milho de cada sulco, que compõem cada um dos cenários,
2. Retiraram-se as cinco primeiras folhas e a espiga.

Portanto, considerando todo o projeto, um pé por sulco, três pés por cenário. Cada cenário corresponde a repetições, porque o tratamento é o mesmo e o volume aplicado também. Em cada bloco do projeto, foram coletadas 9 amostras de folhas e espigas irrigadas com água, e 9 amostras de folhas e espigas irrigadas com efluente.

As amostras de folhas foram lavadas, e juntamente com as amostras de espigas, levadas a estufa para secagem à 65°C. A seguir as amostras foram moídas em moinho de duas facas, para posterior digestão por via úmida.

Para isto, 500 mg de cada amostra (folhas e espigas) foram colocadas em tubos de 75 mL e levadas ao bloco digestor. Seguiu-se a adição de 6 mL de ácido nítrico (HNO₃) concentrado a cada amostra, permanecendo a temperatura de 130°C, até a formação de uma fumaça marrom (óxidos de nitrogênio) que desaparecem em aproximadamente 40 minutos. Mantendo a temperatura por 3 horas, adicionou-se, durante a digestão, gotas de água oxigenada (H₂O₂), até a solução tornar-se incolor. Após atingir esse estágio o volume digerido foi aferido para 10 mL com água no mesmo recipiente, onde a digestão foi realizada.

Todas as misturas e soluções padrão foram preparadas usando água ultrapura Milli-Q (18.2 MΩcm⁻¹), destilada e bi-deionizada.

Após a digestão, foi tomada uma alíquota de 1 mL de cada amostra adicionando-se 100 µL de uma solução de gálio de 102,5 µg.mL⁻¹, adicionado como um padrão interno. Em seguida 5 µL da mistura foi pipetada em discos de Perspex (lucite) e posteriormente submetidas a secagem com lâmpada infravermelha.

4.6.2 Instrumentação

No caso da TXRF com Radiação Síncrotron (SR-TXRF), foi utilizado um ângulo abaixo do crítico para que ocorresse a reflexão total dos raios X incidentes, sendo o detector posicionado a 90° em relação ao feixe.

A estação experimental de fluorescência de raios X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) está equipada com um detector semicondutor de Si(Li), com resolução de 175 eV à 5,9 keV, com janela de berílio de 8 μm de espessura, uma área ativa de 30 mm^2 , acoplado a um módulo amplificador e placa analisadora de pulsos multicanal, inserida dentro de um microcomputador da linha IBM PC.

As amostras foram medidas por um tempo de 100 segundos, na estação de fluorescência de raios X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas, (Figura 4.15) utilizando a técnica da reflexão total, com feixe de radiação policromático na excitação das amostras (Figura 4.16).

As características do anel de armazenamento e da estação de fluorescência de raios X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron são descritas a seguir:

- Energia do elétron no anel de armazenamento: 1,37 GeV (corrente em torno de 100mA)
- Campo magnético do dipolo D09B: 1,67 T
- Anel de armazenamento de elétrons: 93,2 m de perímetro e 30 m de diâmetro
- Acelerador linear de elétrons: 18 m
- Energia crítica do fóton: 2,08 keV
- Frequência de revolução dos elétrons no anel de armazenamento: 3,2MHz
- Fluxo de fótons, à 8 keV, em uma área de 20 mm^2 : $4,2 \times 10^9$ fótons/s
- Feixe policromático (branco) ou seleção de energia entre 3 e 14 keV, utilizando cristal monocromador de silício (111).
- Alto grau de polarização do feixe
- Detectores semicondutores, de Si(Li), com resolução de 165 eV à 5,9 keV e de Ge(HP), com resolução de 150 eV à 5,9 keV
- Posicionamento da amostra utilizando um sistema semi-automático, com movimento tridimensional (PÉREZ, 1999; LNLS, 2000).

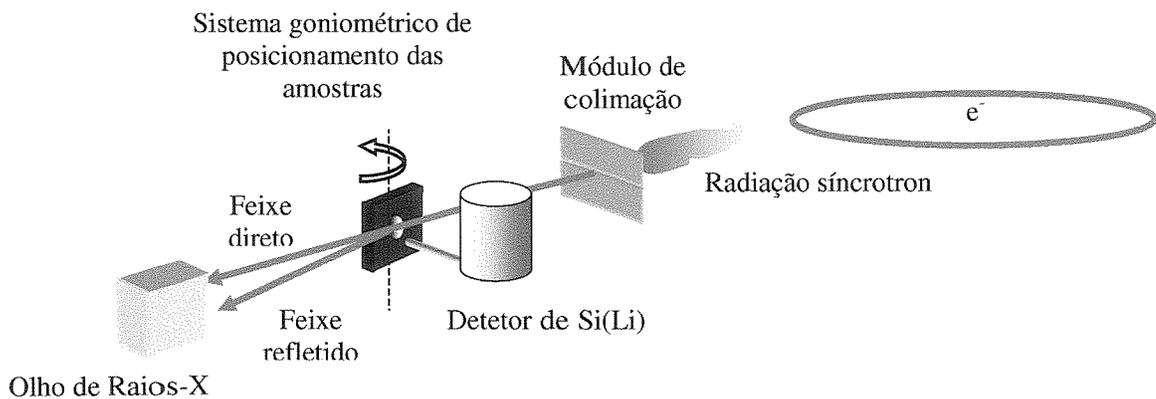


Figura 4.15 - Esquema simplificado da TXRF com excitação por radiação síncrotron.

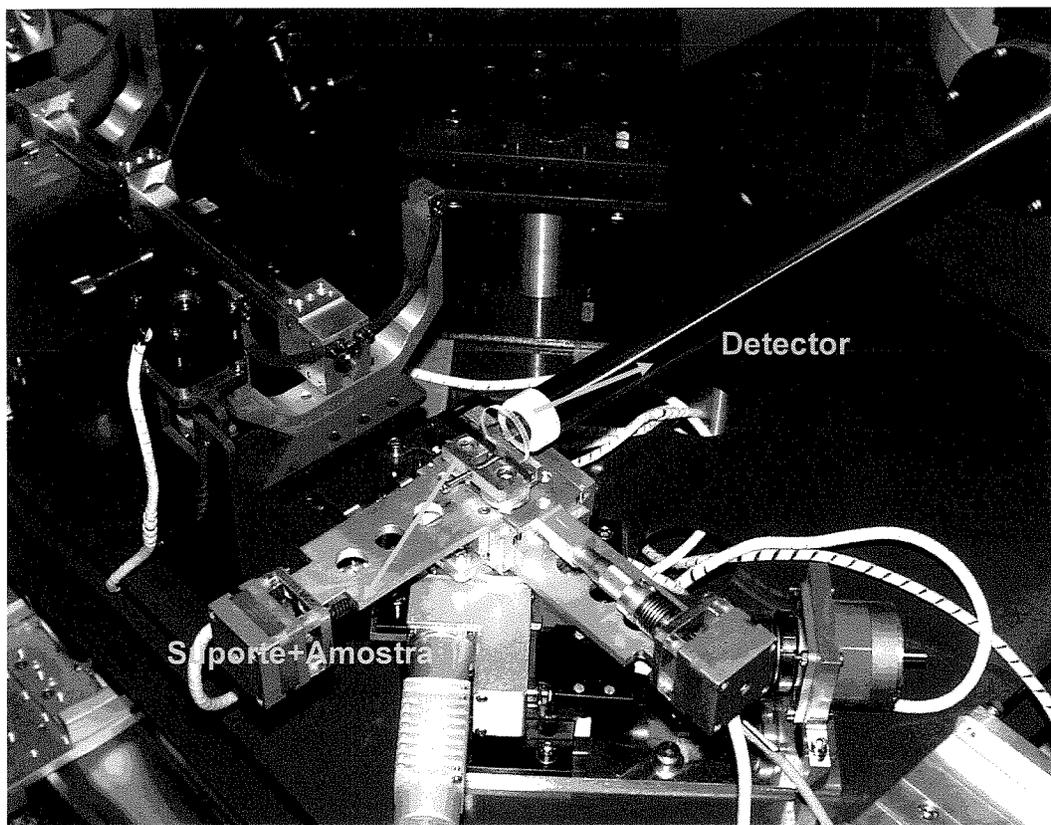


Figura 4.16 - Fotografia do sistema de excitação/detecção da linha de Fluorescência de Raios X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 LEVANTAMENTO PRELIMINAR E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Foram realizados ensaios físicos e químicos do solo, para a caracterização e dimensionamento do sistema de irrigação. Foram determinadas, a densidade global, a curva característica do solo, o ensaio de granulometria e o levantamento topográfico.

5.1.1 Densidade Global

Na Tabela 5.1, são demonstrados os valores determinados em laboratório para a densidade global. Tais valores foram utilizados para o cálculo da lâmina hídrica (H_i) aplicada para cada profundidade de irrigação (20 cm, 40 cm e 60 cm).

5.1.2 Curva Característica da Água no Solo

Foram levantadas curvas características para as quatro camadas do solo, de 0-25 cm, de 25-50 cm, de 50-75 cm e de 75-100 cm na área experimental, as quais se encontram no Anexo B (SILVA, 2003). Das curvas características, foram retirados os dados de Capacidade de Campo

(-0,1 bar), Umidade Crítica (-0,8 bar) e Ponto de Murchamento (-15 bar), que foram realizados para o cálculo das lâminas hídricas e para o controle da frequência de irrigação.

Tabela 5.1 – Densidade global (Dg) do solo nas profundidades de 0-25, 25-50, 50-75 e 75-100 cm

Profundidade	Dg(g/cm³)
0-25	1,68
25-50	1,78
50-75	1,68
75-100	1,82

Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

Tabela 5.2 – Dados de Capacidade de Campo (CC), Umidade Crítica (UC) e Ponto de Murchamento (PM) do solo extraídos das curvas características correspondentes.

Profundidade (cm)	CC (%)	UC (%)	PM (%)
0-25	12,7	8,3	4,8
25-50	12,0	8,0	4,7
50-75	12,4	7,7	4,9
75-100	15,3	9,9	6,7

Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

5.1.3 Ensaio de Granulometria

Caracterizou o solo como Franco Argiloso-Arenoso, que corresponde a um solo com boa qualidade para o desempenho da irrigação com efluentes.

5.1.4 Ensaio da Fertilidade

Foram coletadas amostras do solo em 15 pontos distintos, nas profundidades de 0 a 25 cm e de 20 a 40 cm, formando uma amostra representativa da área experimental, fornecendo os resultados apresentados na Tabela 5.3; que serviram de base, para o cálculo da quantidade de adubo a ser aplicado no cenário água.

Tabela 5.3 – Ensaio de fertilidade para o solo natural

Prof (cm)	pH CaCl ₂	M.O. (g/dm ³)	P resina (mg/dm ³)	K (1)	Ca (1)	Ma (1)	H+Al (1)	Al (1)	S.B. (1)	CTC (1)	Sat. bases (V%)	Sat. Al (m%)
0-20	4,3	17	4	1,2	13	7	28	3	21	49	43	12
20-40	4,2	9	3	0,6	8	4	18	4	13	31	41	24

Nota: (1) – resultados expressos em nmol/dm³

Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

Tabela 5.4 – Cálculo dos parâmetros de projeto do sistema de irrigação para as profundidades de irrigação estabelecidas (20 cm, 40 cm e 60 cm).

Perfil do solo (cm)	h (cm)	CC (%)	UC (%)	PM (%)	Dg (g/cm ³)	Dr (g/cm ³)	p (%)	AD (mm)	Hi (mm)
0-20	20	12,7	8,3	4,8	1,68	2,60	35,4	26,5	14,8
0-40	40	12,2	8,0	4,8	1,72	2,63	34,6	51,1	28,8
0-60	60	12,2	7,8	4,8	1,72	2,62	34,4	76,3	45,4

Fonte: adaptado de SILVA, 2003

5.1.5 Volume Aplicado

O volume aplicado em cada sulco, em função das dimensões do sulco e da lâmina hídrica calculada (Hi) para cada profundidade de irrigação, foi calculado pela Equação 4.3, e é apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Volume aplicado por sulco para as três profundidades de irrigação.

h (cm)	Hi (mm)	V (L)
20	14,8	60
40	28,8	120
60	45,4	180

Fonte: adaptado de SILVA, 2003

5.2 OPERAÇÃO DO SISTEMA

A safra iniciada em 21/03/2001 foi seca, com um ciclo vegetativo de 115 dias. Foi uma safra bem regular, ótima para o desenvolvimento experimental por não ter ocorrido grandes eventos climáticos [SILVA, 2003].

No estágio inicial, todos os cenários receberam a lâmina hídrica referente a profundidade de 20 cm, a fim de estimular o seu desenvolvimento conforme recomendação [SILVA, 2003]. No estágio de desenvolvimento, passou-se a aplicar as lâminas diferenciadas e correspondentes às profundidades de irrigação de 20 cm, 40 cm e 60 cm. No estágio de maturação, quando a planta pára de absorver líquido, cessou-se a irrigação. A Tabela 5.6 apresenta os dias em que ocorreram as mudanças de cada estágio do ciclo vegetativo, e a Tabela B.1 do Anexo B apresenta os dias em que foram irrigados os cenários correspondentes às profundidades de irrigação de 20 cm, 40 cm e 60 cm, com as devidas intensidades pluviométricas diárias [SILVA, 2003].

Tabela 5.6 – Dias de mudança de estágio do ciclo vegetativo do milho.

Dia	Data	Estágio do Ciclo Vegetativo
1	21/03/2001	Inicial
28	17/04/2001	Desenvolvimento
72	31/05/2001	Intermediário
102	30/06/2001	Maturação
115	12/07/2001	Colheita

Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

5.3 ANÁLISE AGRONÔMICA

Na fase inicial foi identificado um maior crescimento nos cenários irrigados com água, pois o solo, naquele instante, não contava com uma biomassa capaz de digerir o efluente aplicado. O cenário irrigado com efluente atingiu um crescimento significativo, em cerca de 75 dias do seu ciclo vegetativo (Figura 5.1).

O desempenho agrícola pode ser comparado pela evolução do ciclo vegetativo da planta nos cenários irrigados. Comparando o aspecto do milho irrigado com água e adubo e, com efluente (Figura 5.2 (a) e (b)), nota-se que o crescimento do milho foi semelhante nos dois tratamentos. Pode-se verificar também que a produção de biomassa foi maior quando a cultura foi irrigada nos sulcos de 60 cm de profundidade (Figura 5.3).

A Figura 5.4 apresenta os resultados da comparação entre a altura dos pés de milho e a altura de inserção da espiga, já a Figura 5.5, apresenta os resultados de comparação entre o número de espigas e o número de pés de milho; ambas mostram que todas as variáveis apresentam diferenças significativas para o fator volume de aplicação.

Conclui-se que o volume de aplicação de irrigação de 180 L apresentou melhores resultados para todas as variáveis apresentadas. Somente a altura de inserção da espiga apresentou diferenças entre os tratamentos de aplicação de água mais adubo e de efluente anaeróbio.



Figura 5.1 – Desempenho do milho irrigado e não irrigado, no centro da figura, o bom desempenho da cultura irrigada com efluente.

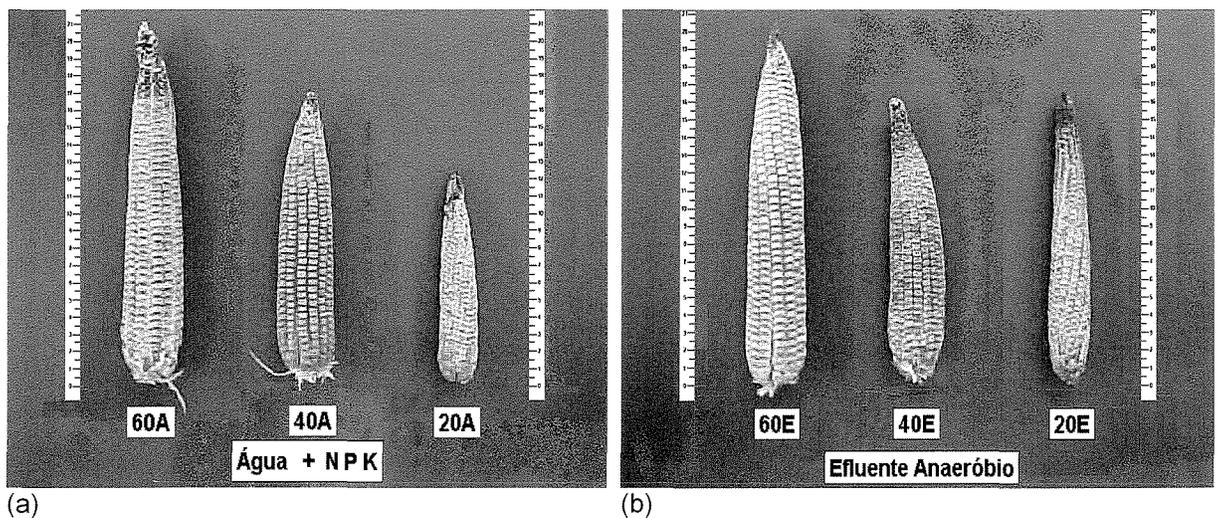


Figura 5.2 - Aspecto do milho irrigado nas taxas de 20 cm, 40 cm e 60 cm de profundidade de irrigação.

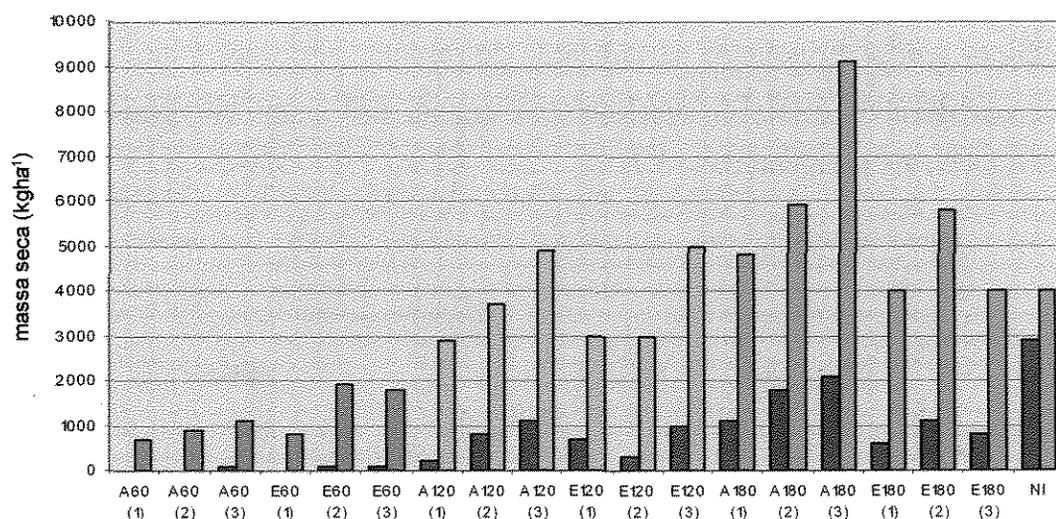


Figura 5.3 - Produção de biomassa medida através da massa seca (kg ha^{-1}) de espiga e grãos (■). Os resultados são apresentados para os volumes de irrigação de 60 L (■), 120 L (■), 180 L (■) e não irrigado (NI) (■), com a aplicação de água (A) ou esgoto (E) para os cenários (1, 2 ou 3).

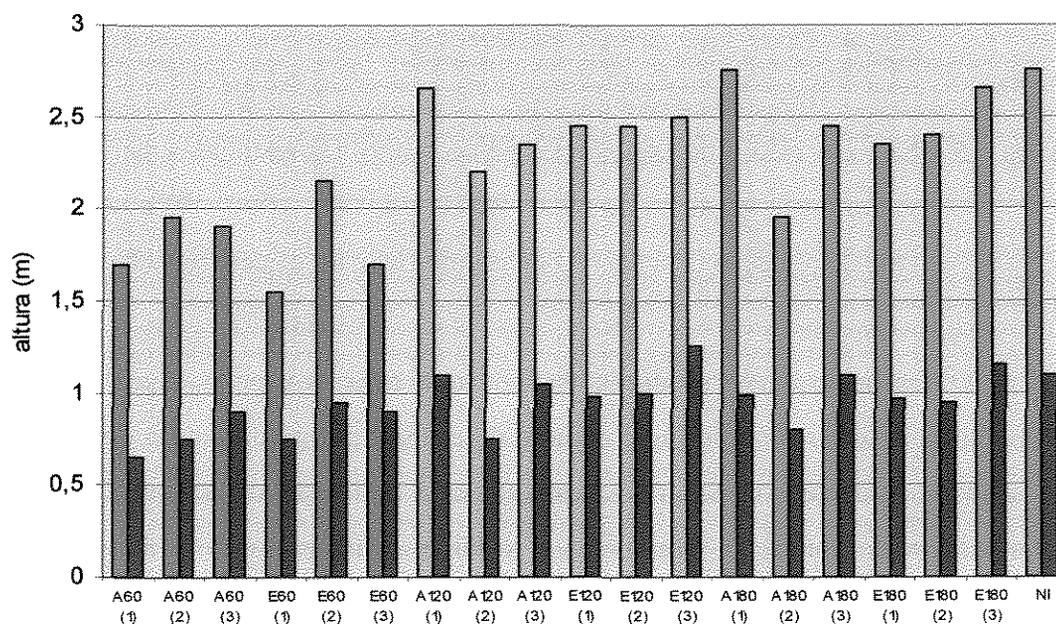


Figura 5.4 - Altura (m) média dos pés de milho e da inserção da espiga (■). Os resultados são apresentados para os volumes de irrigação de 60L (■), 120L (■), 180L (■) e não irrigado (NI) (■), com a aplicação de água (A) ou esgoto (E) para os cenários (1, 2 ou 3).

A utilização do efluente anaeróbico para a irrigação de culturas pode levar ao aumento de produção sem a necessidade da utilização de insumos agrícolas. Este aumento é atribuído à presença de altos níveis de nutrientes no esgoto, tais como nitrogênio, fósforo e potássio [PESCOD, 1992] (Figuras 5.6 e 5.7).

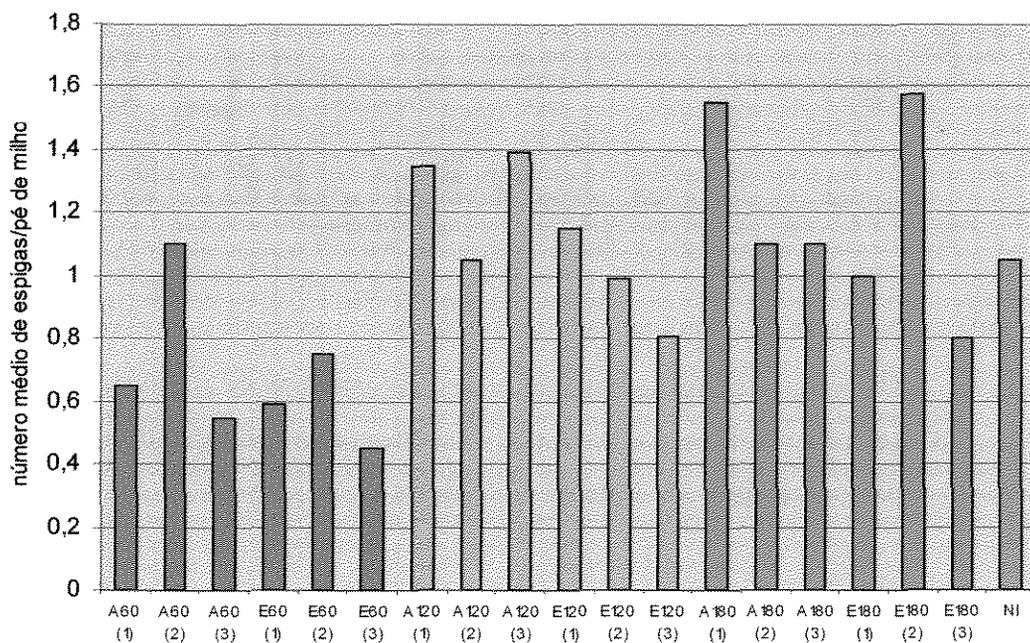


Figura 5.5 - Número médio de espigas por pé de milho. Os resultados são apresentados para os volumes de irrigação de 60L (■), 120L (▨), 180L (▩) e não irrigado (NI) (■), com a aplicação de água (A) ou esgoto (E) para os cenários (1, 2 ou 3).

Observou-se que a produção de biomassa para as espigas e grãos, altura dos pés de milho, altura de inserção da espiga, número de espigas por pé e número de pés de milho com a aplicação de efluente anaeróbico foi equivalente à aplicação de adubo (NPK), para todas as profundidades de aplicação. Entretanto, o volume de irrigação aplicado de 180 L apresentou melhores resultados quando comparado com os demais.

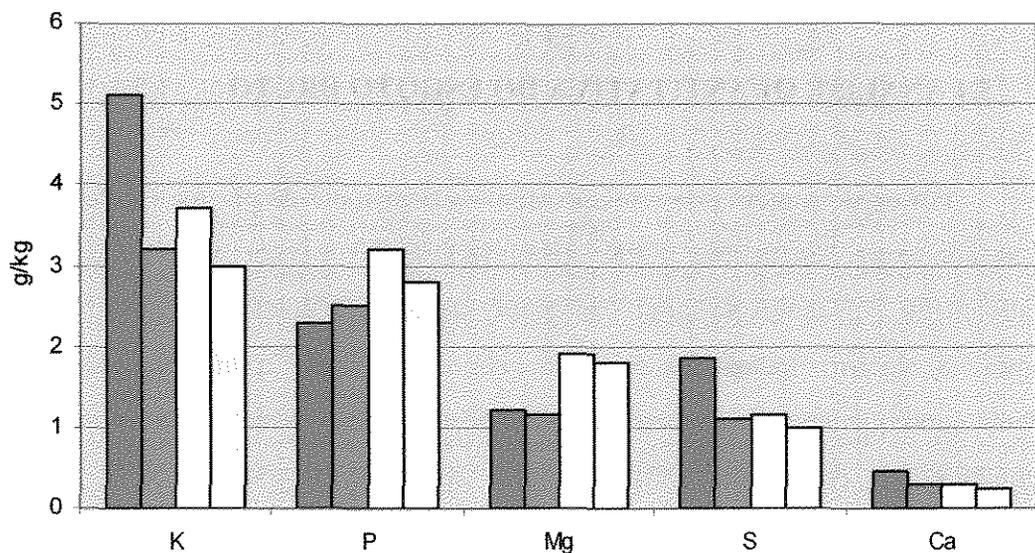


Figura 5.6 – Concentrações de K, P, Mg, S e Ca, em g kg^{-1} , translocadas para os grãos de milho. Os resultados são apresentados para as plantas não irrigadas (NI) () e para os volumes de irrigação de 60 L (■), 120 L (▒) e 180 L (░).

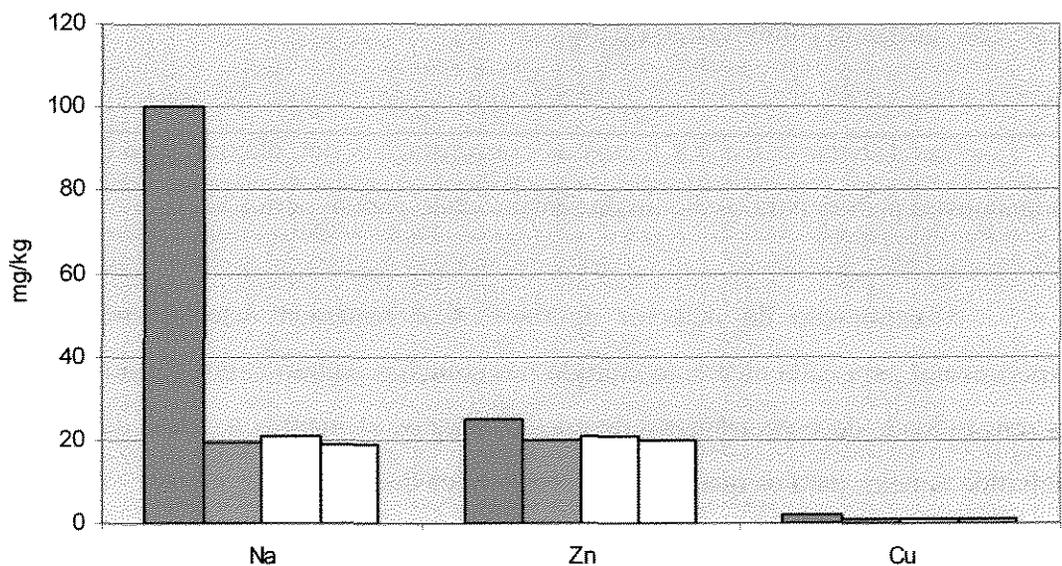


Figura 5.7 – Concentrações de Na, Zn e Cu, em mg kg^{-1} , translocadas para os grãos de milho. Os resultados são apresentados para as plantas não irrigadas (NI) () e para os volumes de irrigação de 60 L (■), 120 L (▒) e 180 L (░).

5.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DO ESGOTO BRUTO

Por espectrometria de emissão atômica com fonte de plasma (ICP-AES) determinaram-se as concentrações de Na, P, K e Mg [STEFANUTTI et al, 2002], que se mantiveram relativamente constantes ao longo das quatro semanas de coleta de esgoto bruto, como mostra a Figura 5.8. Na primeira semana de coleta a concentração de Ca foi aproximadamente o dobro das coletas subsequentes. As concentrações de S, Cu, Ni e Zn aumentaram significativamente na segunda coleta comparada com as outras. As concentrações de S de duas vezes, já nas concentrações de Cu, Ni e Zn (Figura 5.9) o aumento foi de aproximadamente dez vezes.

5.5 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA E LIMITE DE DETECÇÃO POR SR-TXRF

Para realizar a calibração do sistema de detecção, e posteriormente ser possível calcular a sensibilidade relativa, foram preparadas dez soluções padrão contendo o elemento gálio (Ga), neste caso utilizado como padrão interno.

Nas Tabelas 5.7 e 5.8 temos as concentrações dos elementos e do padrão interno em cada amostra padrão para o cálculo da sensibilidade para as séries K e L, respectivamente.

A calibração do detector de raios X é realizada determinando-se a sensibilidade experimental para cada elemento contido nas soluções padrão e, em seguida, levantando a curva da sensibilidade do espectrômetro de raios X para os elementos na faixa de energia de interesse, incluindo aqueles para os quais não se têm padrões disponíveis.

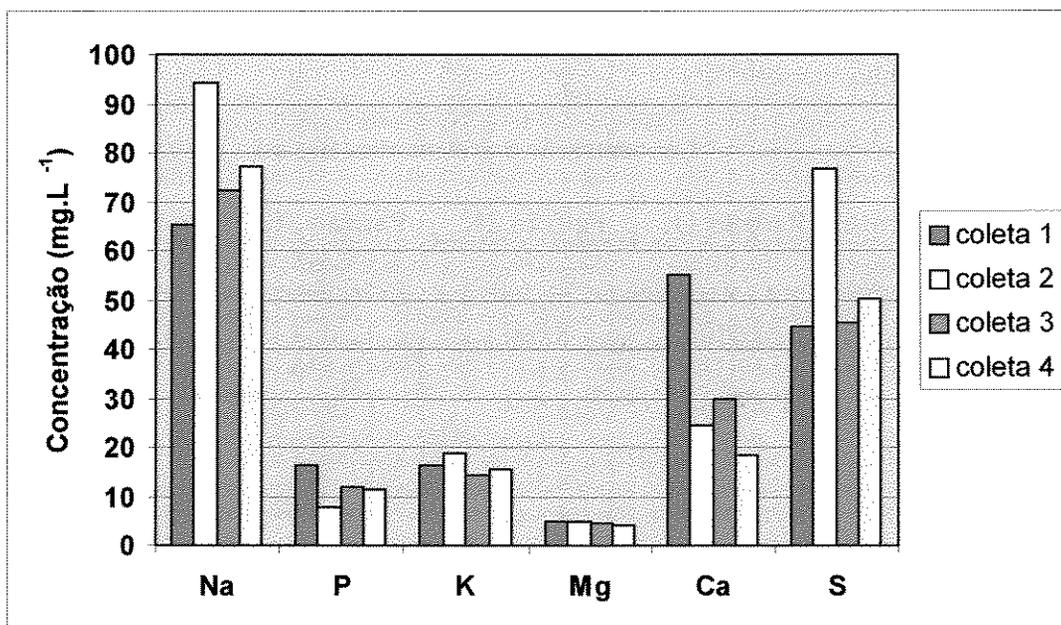


Figura 5.8 – Concentração de Nutrientes (Na, P, K, Mg, Ca e S) presente no esgoto bruto coletado ao longo de 4 semanas [SILVA, 2003].

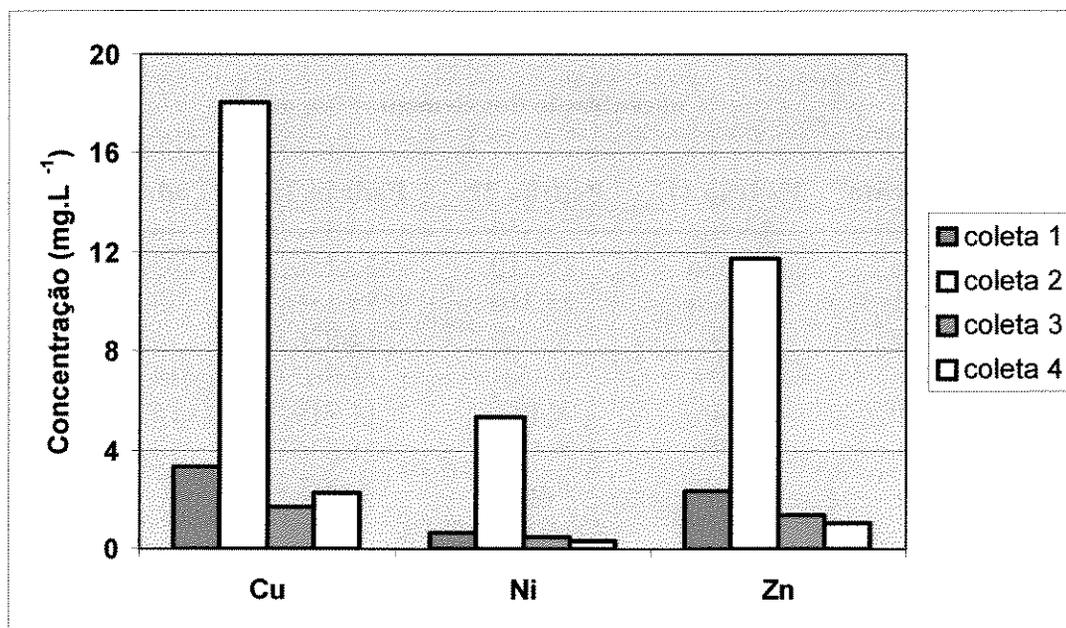


Figura 5.9 – Concentração de metais (Cu, Ni e Zn) presentes no esgoto bruto coletado ao longo de 4 semanas (Sequências 1, 2, 3 e 4).[SILVA, 2003].

Tabela 5.7 – Concentração dos elementos nas soluções padrão, empregados para a calibração das linhas da série K.

Concentração dos elementos ($\mu\text{g.mL}^{-1}$)						
Z	Elemento	Padrão 1K	Padrão 2K	Padrão 3K	Padrão 4K	Padrão 5K
13	Al	13,665	25,462	35,748	44,797	52,819
14	Si	13,830	25,769	36,180	45,338	53,457
19	K	4,619	8,607	12,084	15,143	17,855
20	Ca	4,633	8,632	12,120	15,188	17,908
22	Ti	4,564	8,504	11,940	14,962	17,642
24	Cr	4,564	8,504	11,940	14,962	17,642
26	Fe	4,578	8,530	11,976	15,008	17,695
28	Ni	4,587	8,547	12,000	15,038	17,730
30	Zn	4,564	8,504	11,940	14,962	17,642
34	Se	4,495	8,376	11,760	14,737	17,376
38	Sr	4,610	8,590	12,060	15,113	17,819
42	Mo	4,587	8,547	12,000	15,038	17,730
31	Ga	9,404	8,761	8,200	7,707	7,270

Tabela 5.8 – Concentração dos elementos nas soluções padrão, empregados para a calibração das linhas da série L.

Concentração dos elementos ($\mu\text{g.mL}^{-1}$)						
Z	Elemento	Padrão 1L	Padrão 2L	Padrão 3L	Padrão 4L	Padrão 5L
38	Sr	13,705	25,336	35,332	44,015	51,627
42	Mo	13,636	25,210	35,156	43,796	51,370
48	Cd	13,636	25,210	35,156	43,796	51,370
56	Ba	4,591	8,487	11,836	14,745	17,295
78	Pt	4,409	8,151	11,367	14,161	16,610
81	Tl	4,545	8,403	11,719	14,599	17,123
82	Pb	4,591	8,487	11,836	14,745	17,295
31	Ga	9,318	8,613	8,008	7,482	7,021

Os padrões foram irradiados por 100 s e os espectros obtidos foram ajustados com a utilização do software QXAS, obtendo-se a área líquida dos picos dos raios X característicos que estão presentes nos padrões.

As curvas da sensibilidade relativa e do limite de detecção, determinadas para a análise quantitativa por SR-TXRF estão apresentadas nas Figuras 5.10 a 5.12.

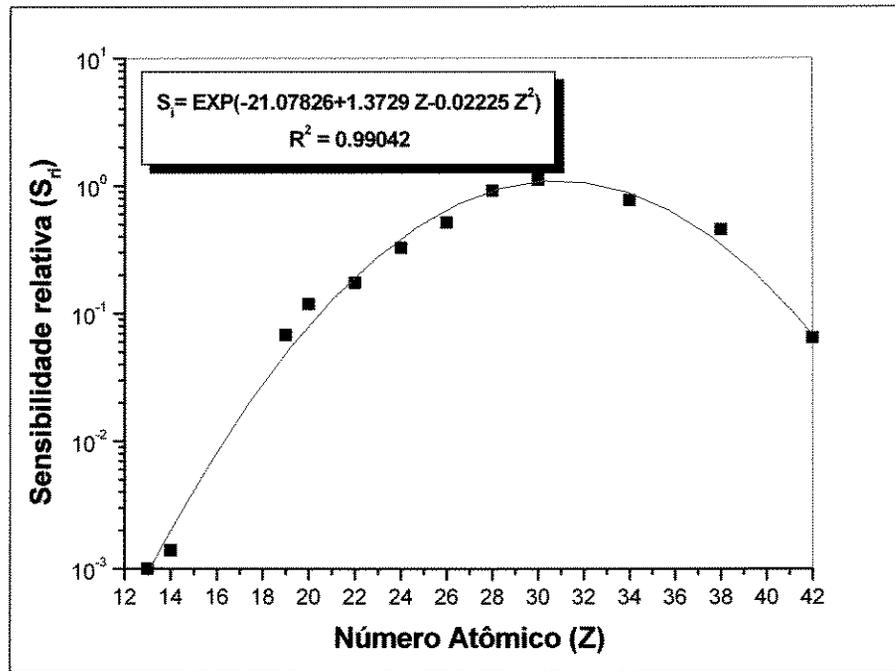


Figura 5.10 - Curva da sensibilidade relativa para os elementos da serie K por SR-TXRF.

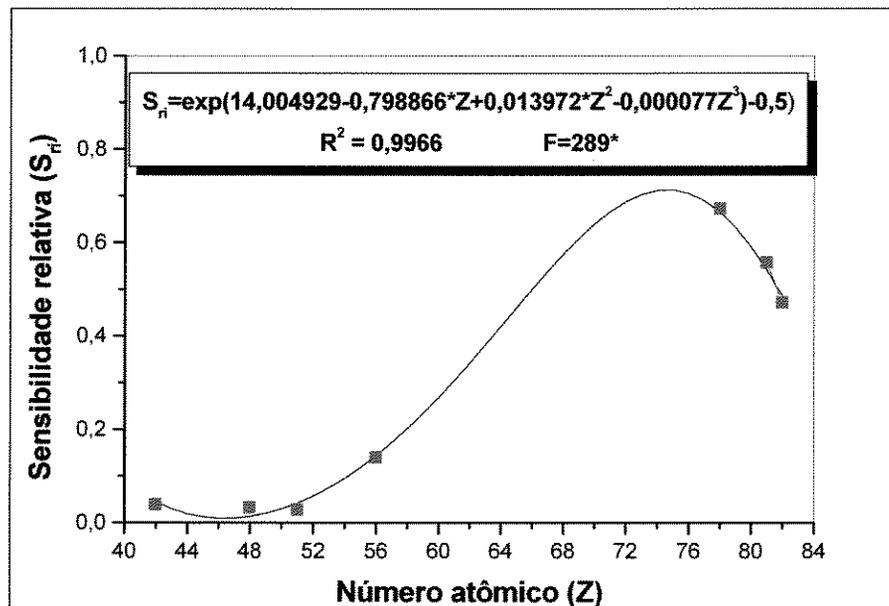


Figura 5.11 - Curva da sensibilidade relativa para os elementos da serie L por SR-TXRF.

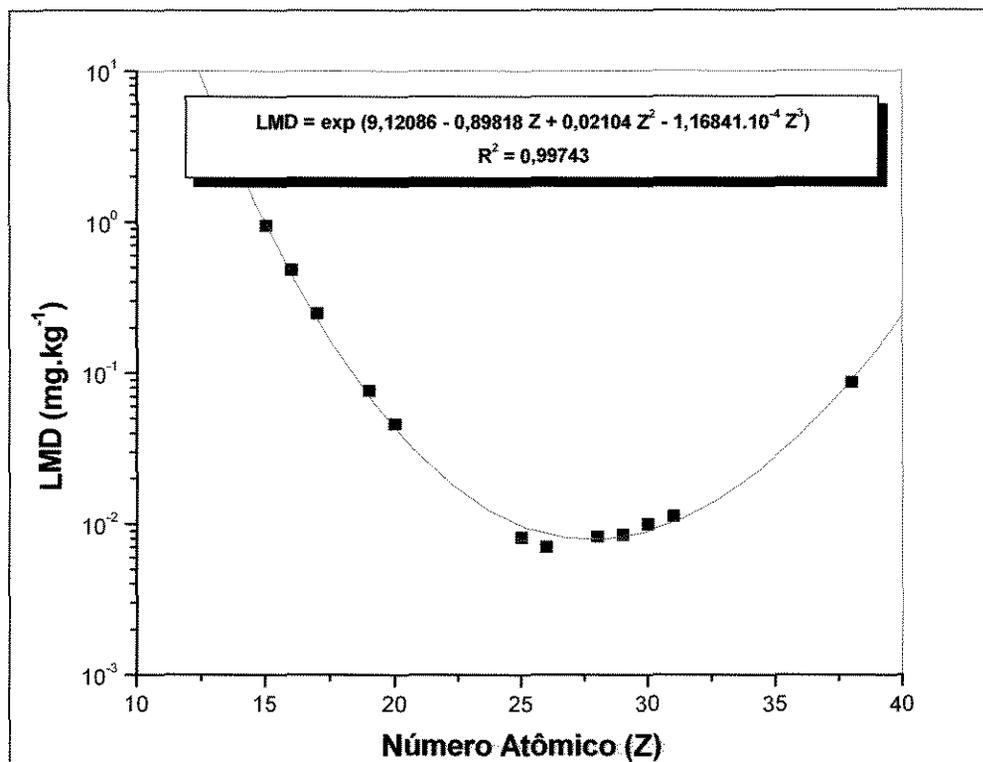


Figura 5.12 - Curva do limite de detecção para os elementos da serie K por SR-TXRF.

5.6 ANÁLISE QUANTITATIVA DAS FOLHAS E ESPIGAS DO MILHO IRRIGADO COM ESGOTO E ÁGUA.

Nas Figuras 5.13 a 5.28 são apresentados os valores das concentrações médias de Si, P, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba e Pb para amostras de folha e espiga, irrigadas com esgoto e água, e taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF; e os Limites Máximos de Tolerância para Contaminantes Inorgânicos em Alimentos [ANVISA, 1965] para os elementos que se apresentaram acima do permitido.

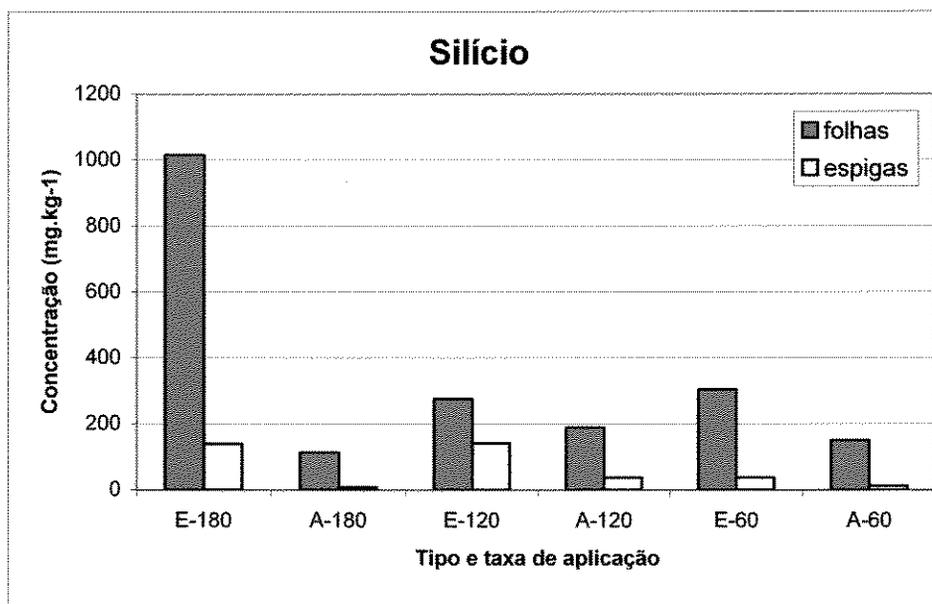


Figura 5.13 - Concentrações médias de Si nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

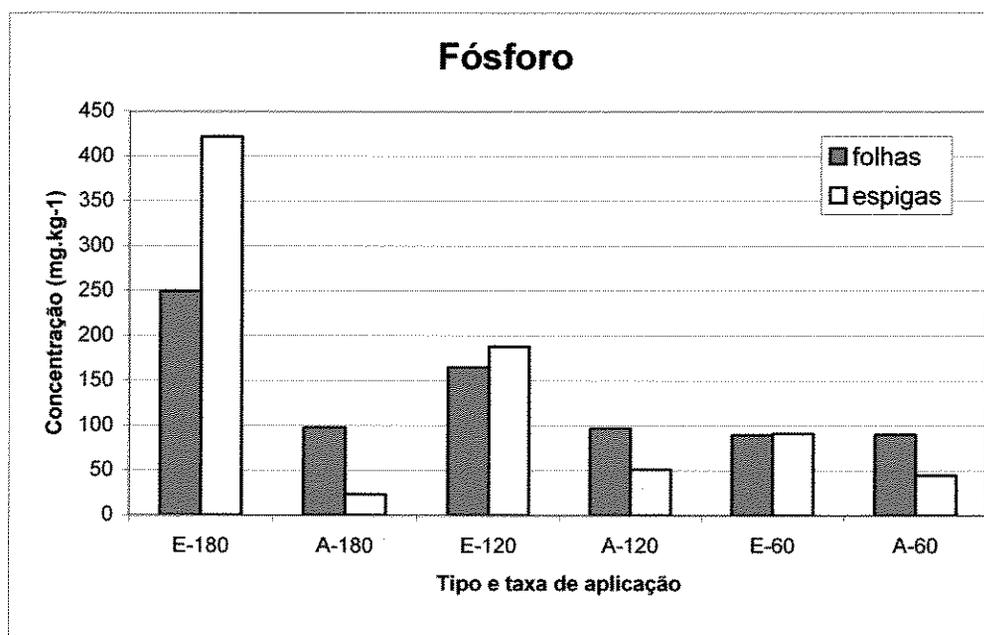


Figura 5.14 - Concentrações médias de P nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

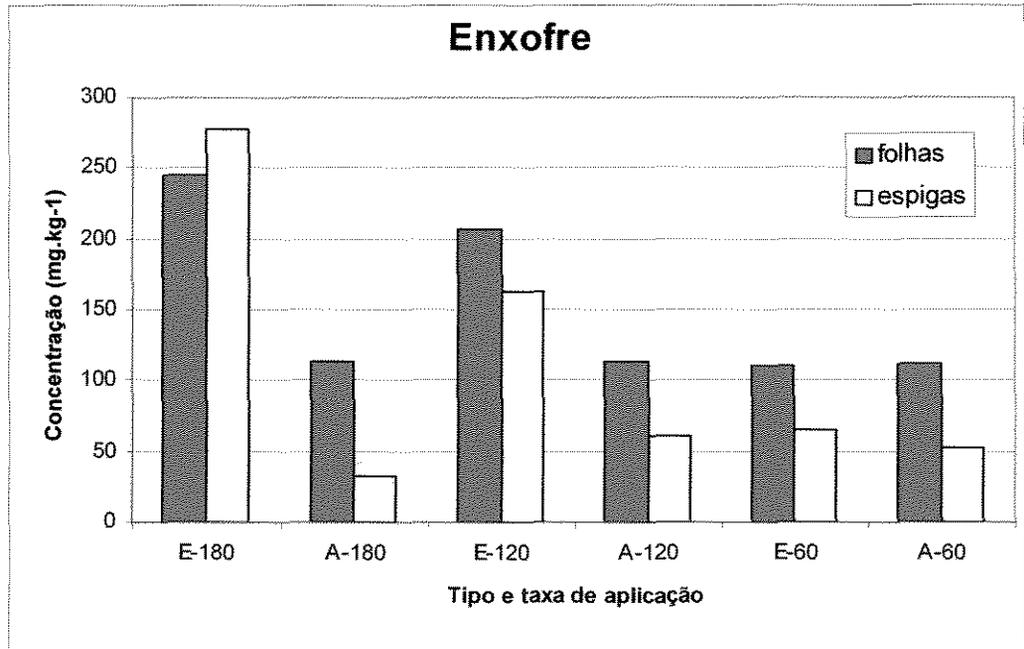


Figura 5.15 - Concentrações médias de S nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

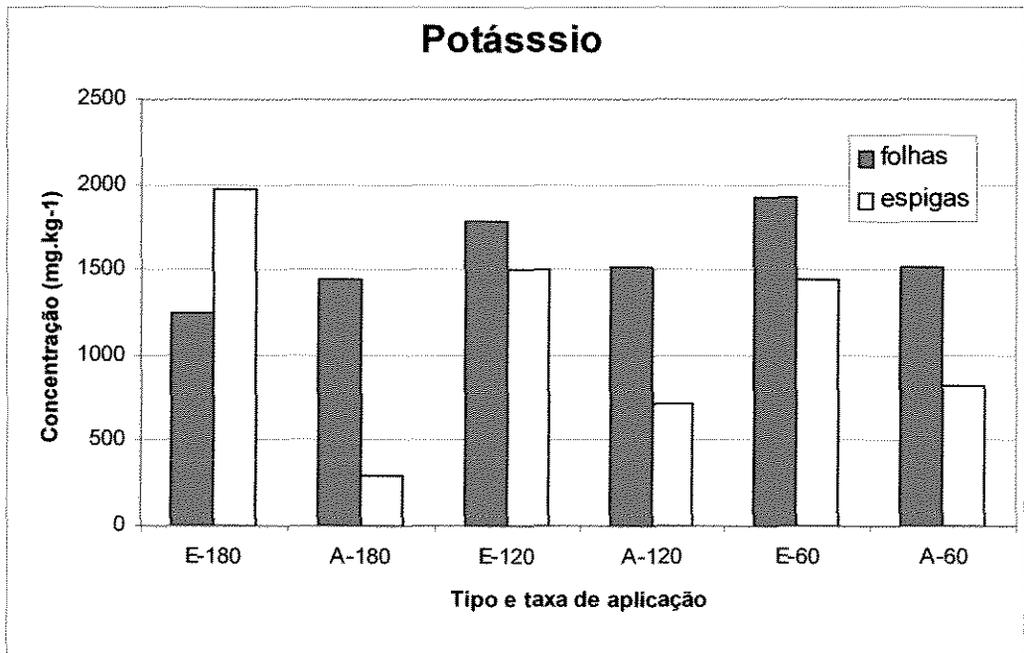


Figura 5.16 - Concentrações médias de K nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

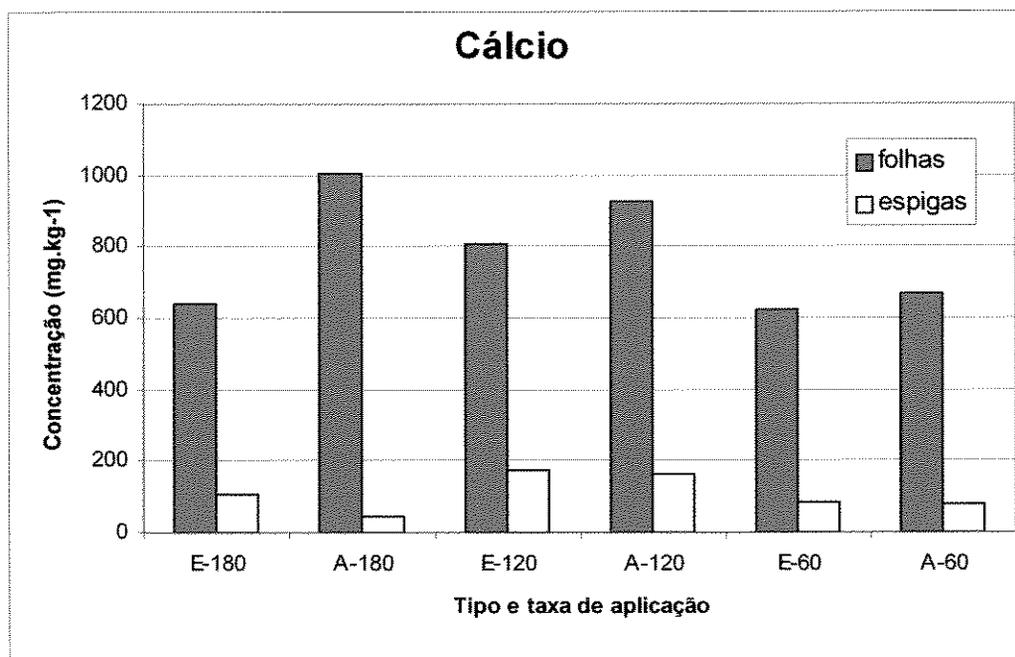


Figura 5.17 - Concentrações médias de Ca nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

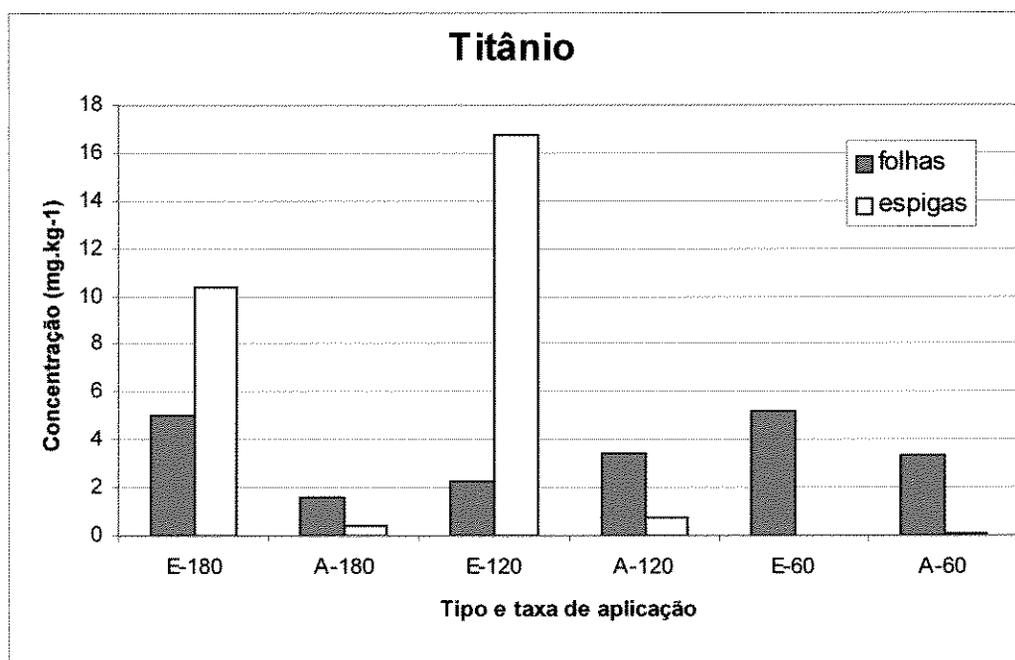


Figura 5.18 - Concentrações médias de Ti nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

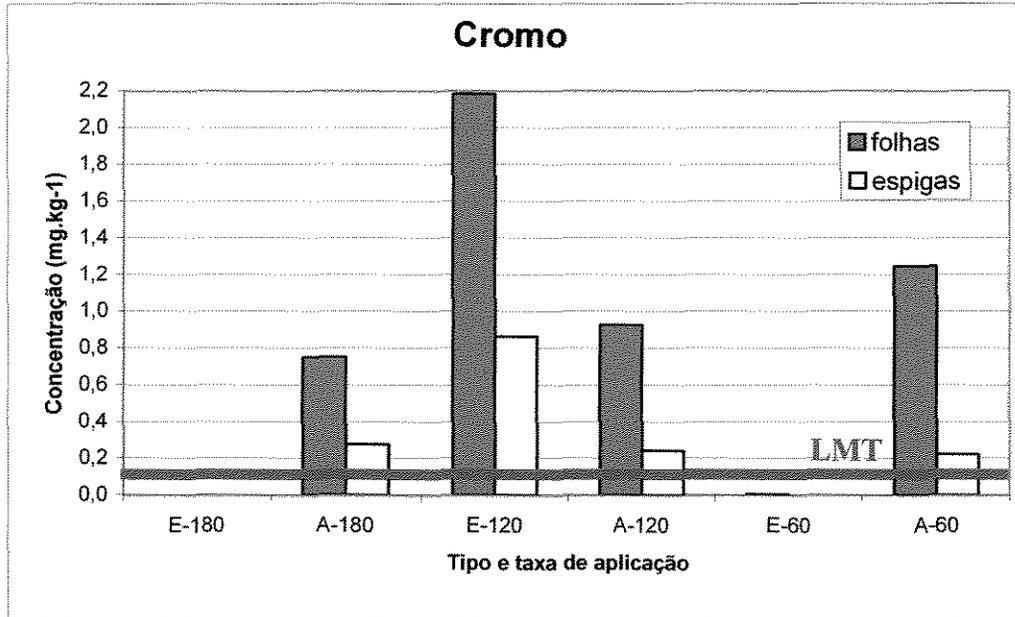


Figura 5.19 - Concentrações médias de Cr nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

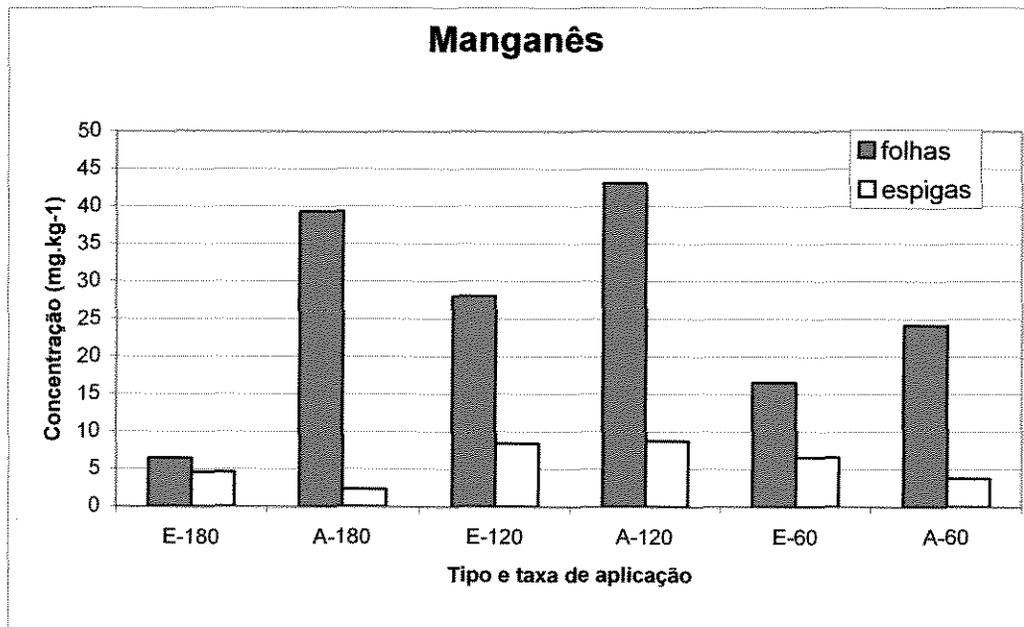


Figura 5.20 - Concentrações médias de Mn nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

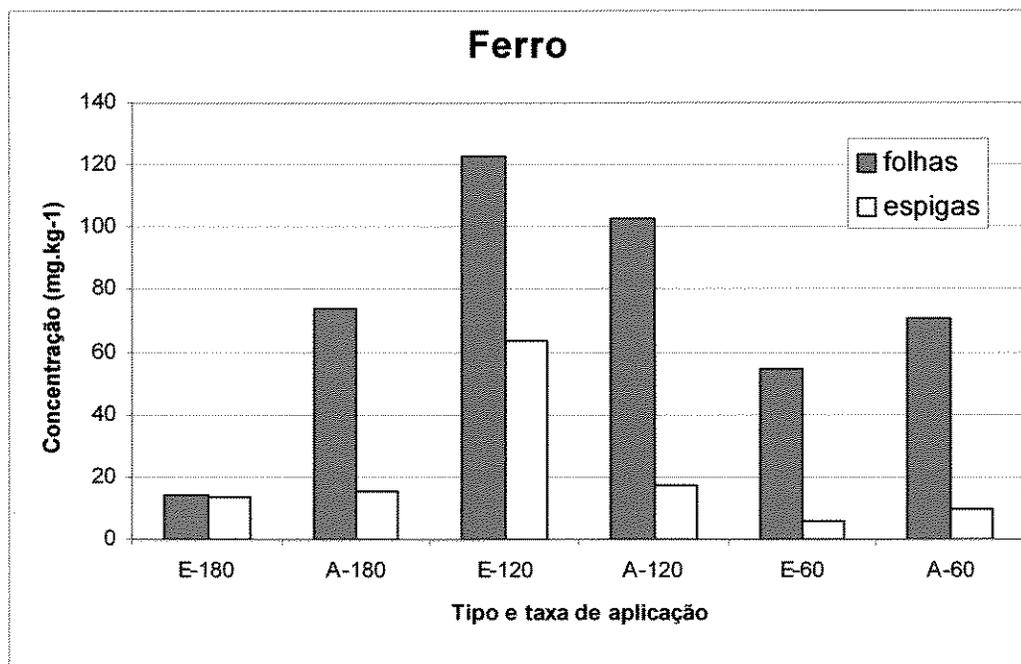


Figura 5.21 - Concentrações médias de Fe nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

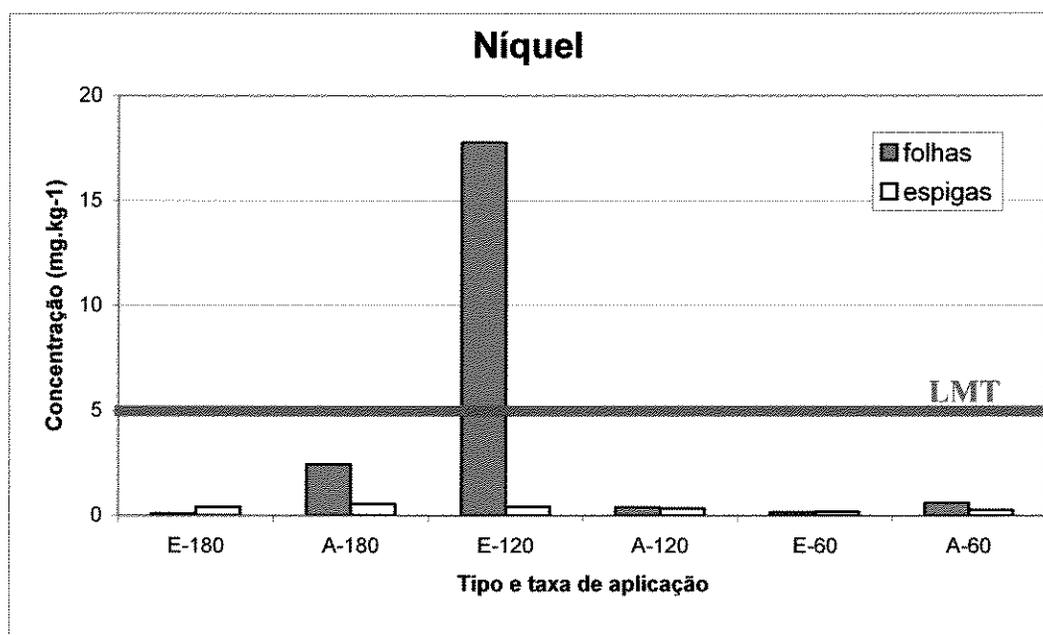


Figura 5.22 - Concentrações médias de Ni nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

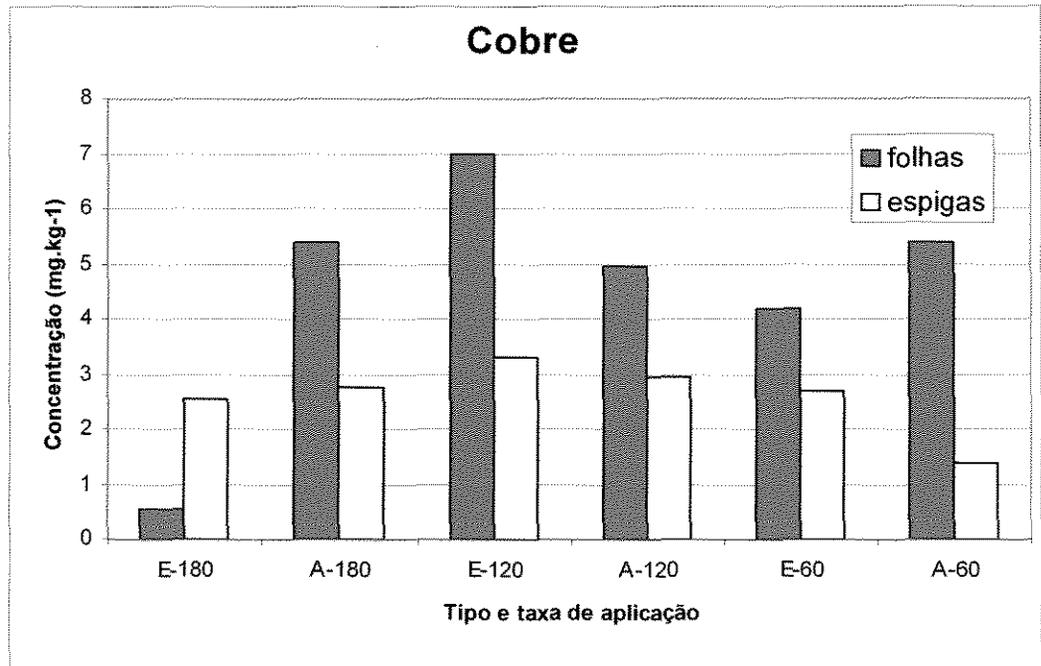


Figura 5.23 - Concentrações médias de Cu nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

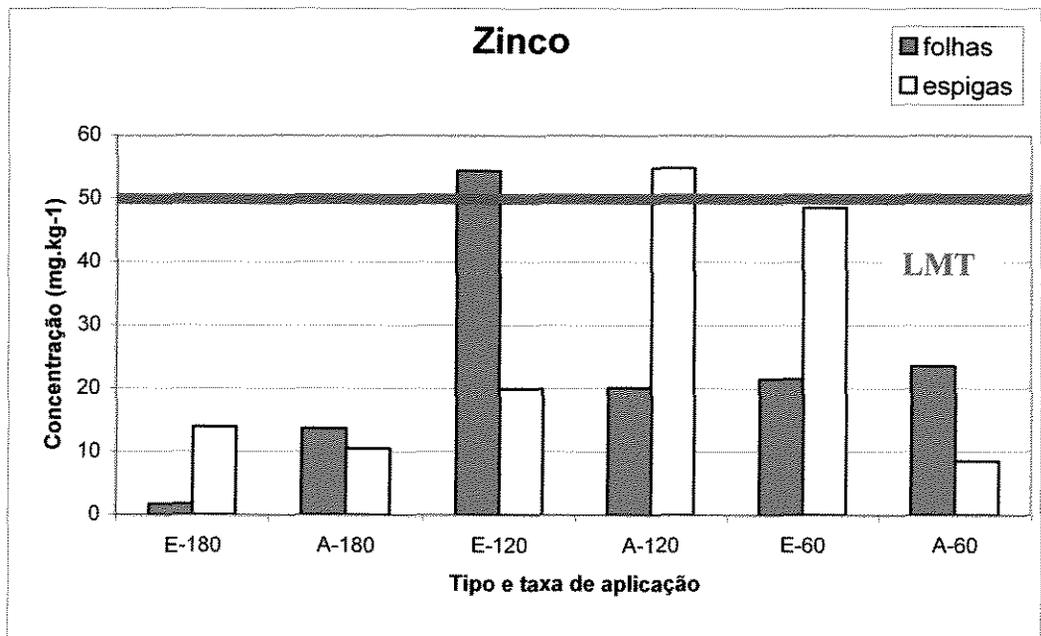


Figura 5.24 - Concentrações médias de Zn nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

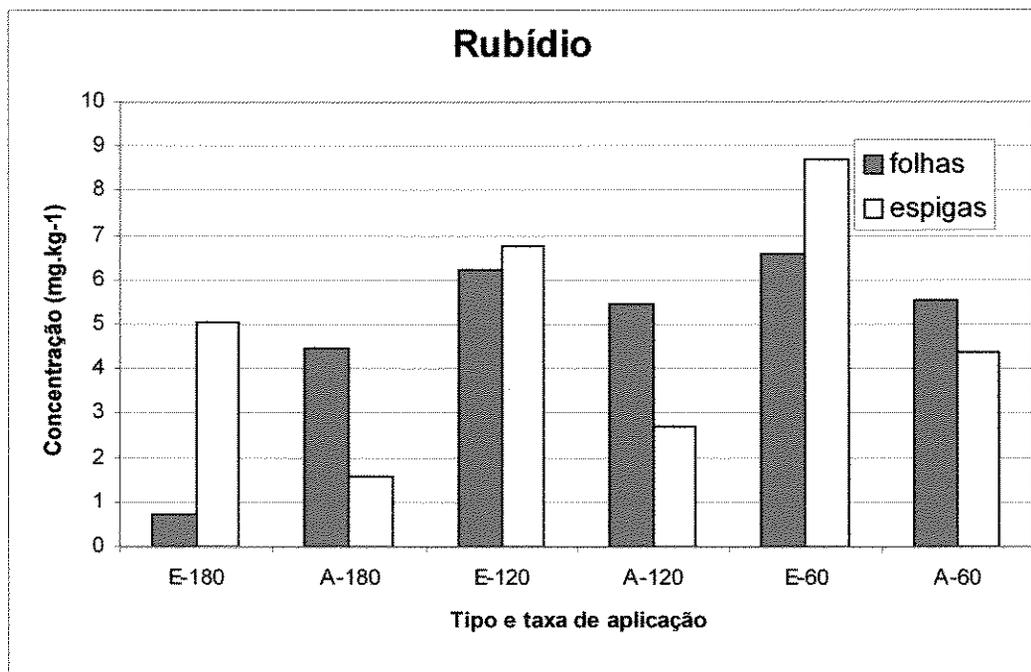


Figura 5.25 - Concentrações médias de Rb nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

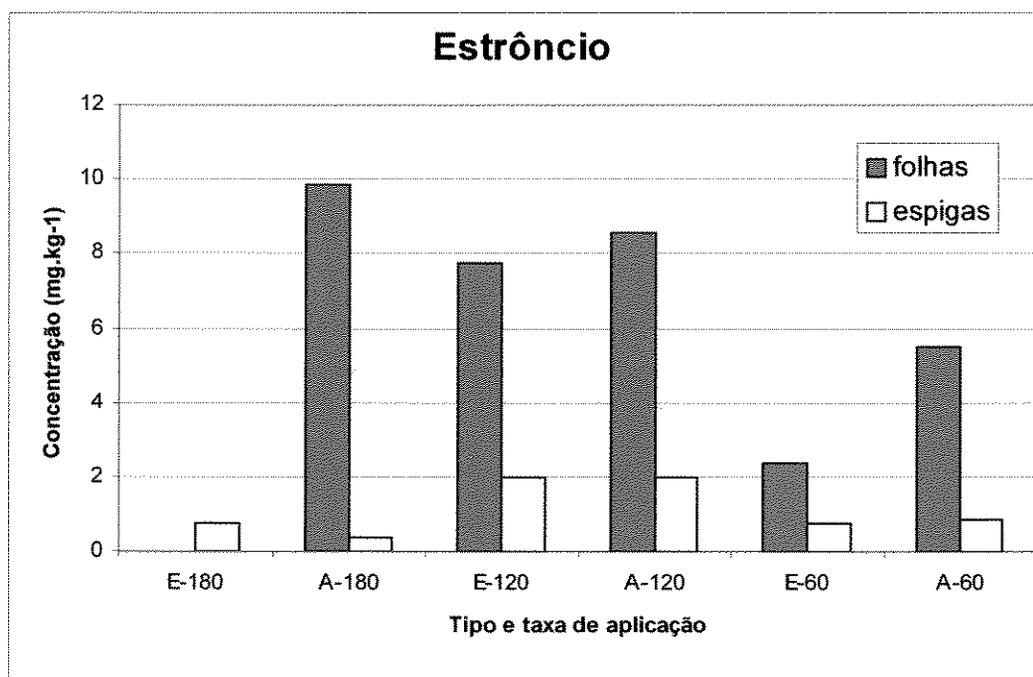


Figura 5.26 - Concentrações médias de Sr nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

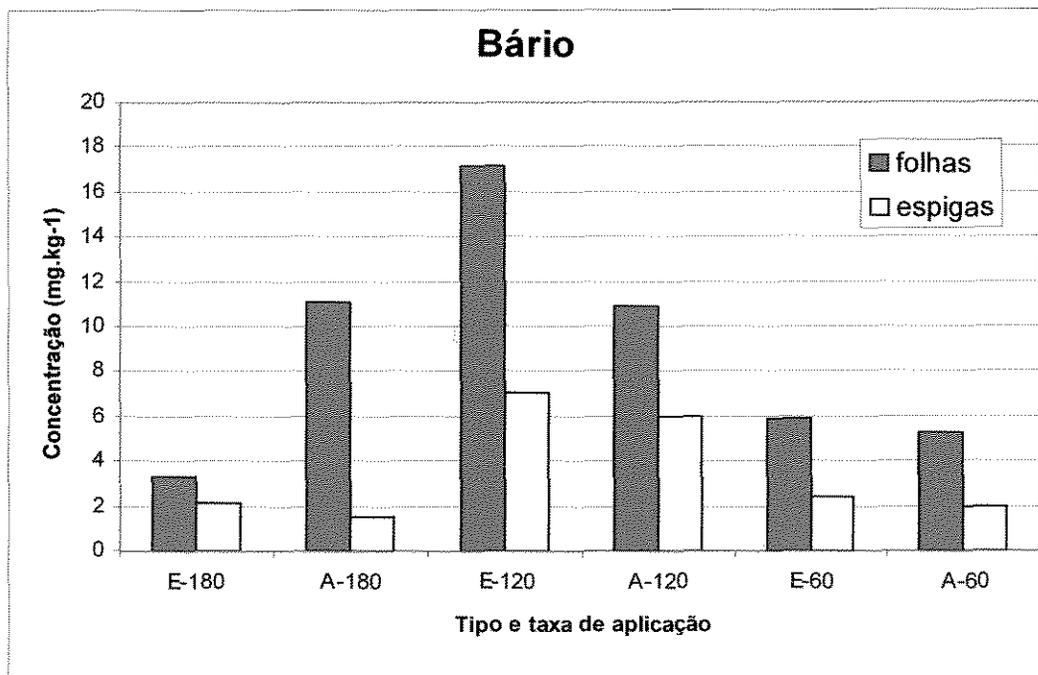


Figura 5.27 - Concentrações médias de Ba nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

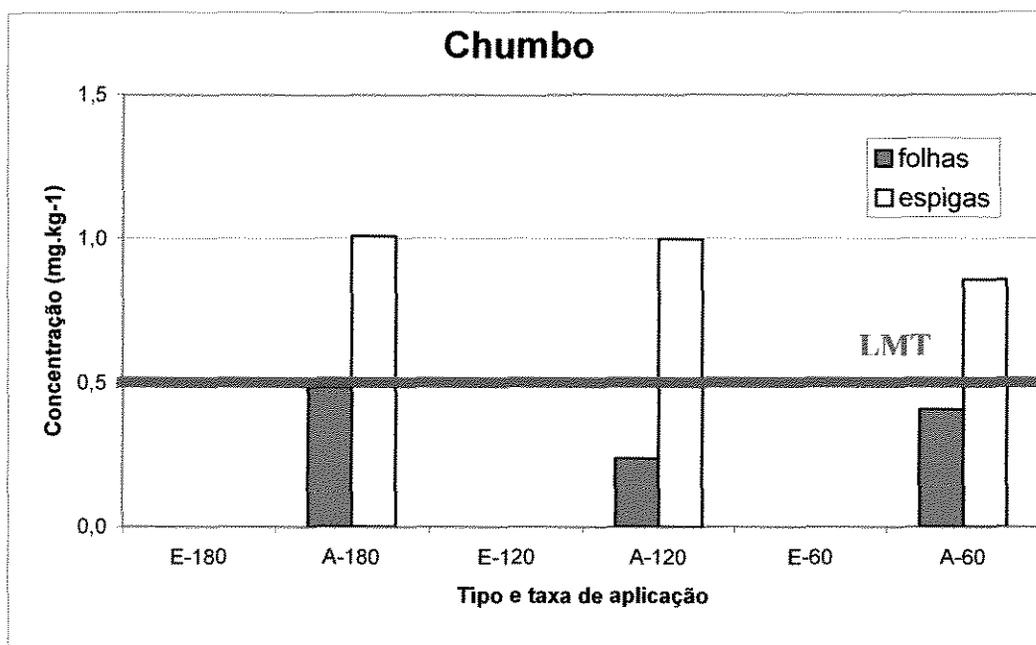


Figura 5.28 - Concentrações médias de Pb nas folhas e espigas de milho irrigado com efluente (E) e água (A) com taxas de 60, 120 e 180 L, determinadas por SR-TXRF.

De acordo com o Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), considera-se alimento, para fins do presente à substância destinada a ser ingerida pelo homem e fornecer elementos necessários a seu desenvolvimento e manutenção. Os Limites Máximos de Tolerância encontram-se na Tabela C.1 do Anexo C, os efeitos causados à saúde humana, encontram-se na Tabela C.2 do Anexo C [CETESB, 2001].

Para o elemento Cr, os valores determinados nas folhas foram superiores aos determinados nas espigas tanto para a irrigação com água quanto para a irrigação com efluente, para todas as taxas de aplicação, e estes estão acima do valor máximo de tolerância estabelecido pela ANVISA (0,1 ppm) para as folhas e espigas irrigadas com água na taxa de 60, 120 e 180 L e, para as folhas e espigas irrigadas com efluente e aplicação de 120 L. O valor máximo determinado foi de 2,18 mg.kg⁻¹ para a irrigação com efluente e taxa de aplicação de 120 L. A ingestão de alimentos ou água com altos níveis de Cromo, causam náuseas, diarreias, danos no fígado e rim, hemorragias internas, dermatites e problemas respiratórios.

Concentrações acima do valor máximo de tolerância para o elemento níquel (5 ppm) também foram observadas nas folhas irrigadas com efluente na taxa de 120 L, obtendo-se um valor de 17,76 mg.kg⁻¹, valor este cinco vezes mais elevado do que o permitido. Normalmente, este elemento está presente em tecidos humanos e, sob condições de alta exposição, com a ingestão por via gastrointestinal, esses níveis podem crescer significativamente. A ocorrência de toxicidade é rara.

Em relação às concentrações de Cu pudemos observar que estas variaram de 0,56 a 6,98 mg.kg⁻¹ e, portanto estão dentro do limite máximo de tolerância estabelecido pela ANVISA que é de 30 mg.kg⁻¹.

Para o elemento Zinco o limite máximo de tolerância é de 50 mg.kg⁻¹, e os valores determinados foram superiores nas folhas irrigadas com efluente (54,38 mg.kg⁻¹) e espigas irrigadas com água (54,85 mg.kg⁻¹) na taxa de aplicação de 120 L. Para as outras situações os valores estão abaixo do estabelecido pela ANVISA. A ingestão de alimentos ou água com elevado nível de zinco provocam febre, diarreia, vômitos e outras irritações gastrointestinais. O zinco, não é considerado carcinogênico.

O limite máximo de tolerância foi ultrapassado também no caso do elemento chumbo (Pb), sendo determinados valores de 1,01; 0,99 e 0,86 nas espigas irrigadas com água em todas as taxas de aplicação, enquanto que nas folhas irrigadas com água os valores medidos estão abaixo do limite máximo de tolerância. Por outro lado para as folhas e espigas irrigadas com efluente este elemento não foi detectado. Como os efeitos crônicos causados pelo chumbo são a perda de apetite, constipação, anemia, fraquezas, cólicas, dores musculares e nas juntas, hipertensão, disfunção renal, má formação congênita, diminuição da quantidade de espermatozoides, danos ao sistema nervoso central e periférico afetando a camada de mielina das fibras motoras. Entretanto, não há indícios de carcinogenicidade.

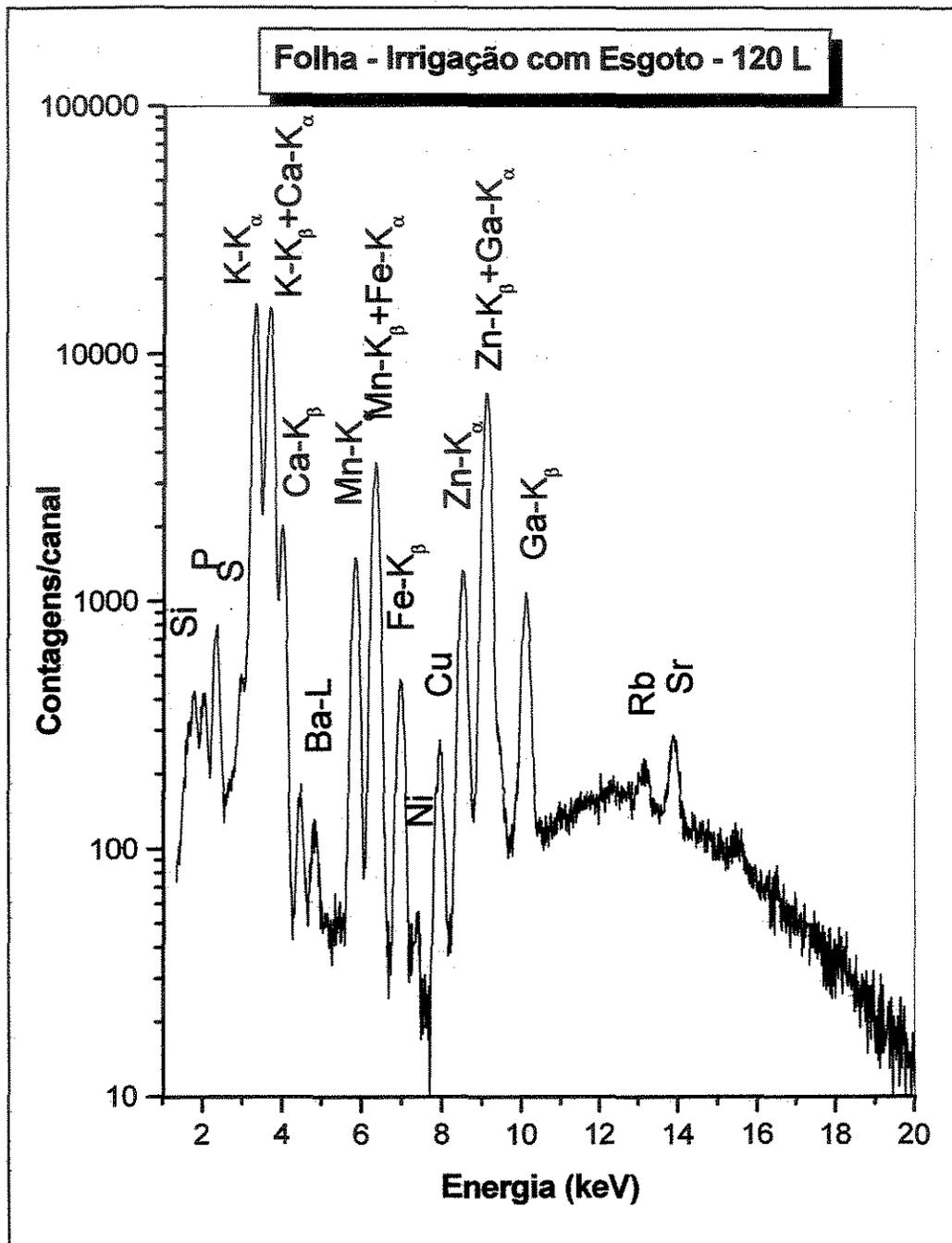


Figura 5.29 – Espectro dos raios X característicos de uma amostra de folha irrigada com 120 L de efluente.

5.7 ANÁLISE FATORIAL

Obtidos os valores médios das concentrações foi aplicada a análise fatorial com a finalidade de se verificar a diferença entre os fatores envolvidos no experimento. Os fatores usados para a análise fatorial foram: os cenários (1, 2 e 3); o tipo de aplicação (água e efluente), e as taxas de aplicação (60 L, 120 L e 180 L). Os resultados obtidos nos permitem concluir que para todos os elementos analisados o fator cenário não é significativo (ao nível de 5%).

Quanto ao tipo de aplicação, ou seja, irrigação com água e efluente, foi observado de forma geral, que a irrigação com esgoto, resultou em maiores valores de concentração para a maioria dos elementos analisados, em ambas as partes da cultura de milho, isto é, para folhas e espigas.

De forma geral, pode-se dizer que existe uma correlação positiva entre a concentração do elemento e a taxa e aplicação para a irrigação com efluente, mas para a irrigação com água isto não foi observado.

Como a taxa de aplicação de 60 L demonstrou não ter diferença significativa com as taxas de 120 e 180 L, tanto para as folhas como para as espigas, foi aplicada a análise de *cluster* para a correlação entre a taxa de aplicação do efluente e da água, assim como a relação com o tipo de aplicação. Para isto empregamos os códigos mostrados na Tabela 5.9 e a análise de *cluster* é mostrada na Figura 5.29.

Tabela 5.9 – Dados empregados para análise do *cluster*.

Código	Parte da Planta	Tipo de Aplicação	Taxa de Aplicação
FE 180	Folha	Efluente	180 L
FA 180	Folha	Água	180 L
FE 120	Folha	Efluente	120 L
FA 120	Folha	Água	120 L
EE 180	Espiga	Efluente	180 L
EA 180	Espiga	Água	180 L
EE 120	Espiga	Efluente	120 L
EA 120	Espiga	Água	120 L

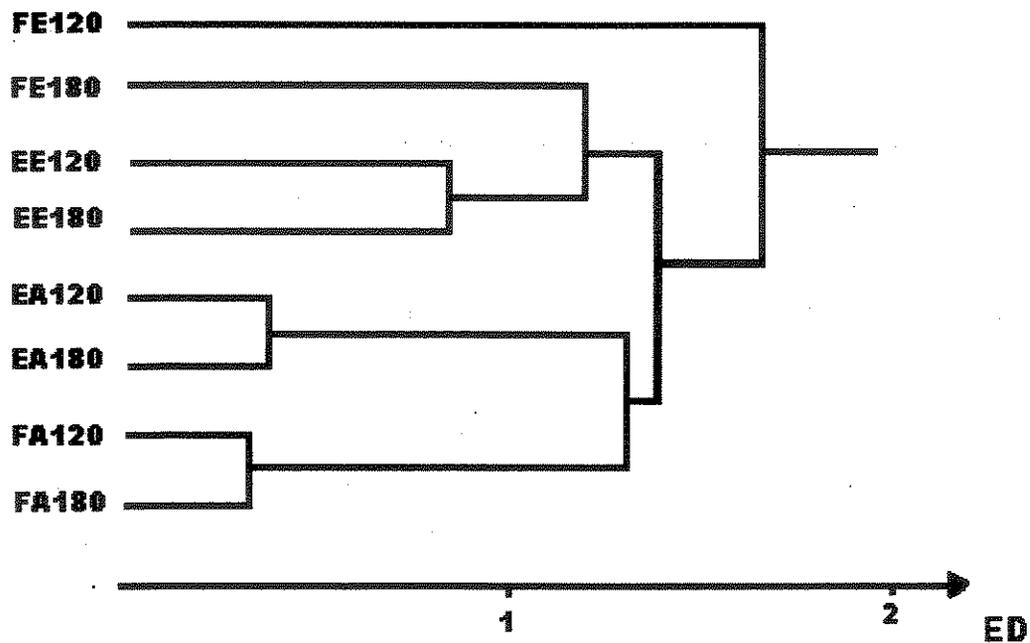


Figura 5.30 – Dendograma para as folhas e espigas de milho irrigado com água e efluente com taxas de aplicação de 120 e 180 L.

Como pode ser visto por esta figura existe uma alta similaridade para as amostras de folhas irrigadas com 120 e 180 L de água e a mesma correlação para as amostras de espiga. Quanto à irrigação com efluente, pode ser observada uma correlação entre dois grupos, o primeiro composto por amostras de folhas irrigadas com 180 L e as de espigas irrigadas com 120 e 180 L e o outro formado pelas amostras de folhas e espigas irrigadas com água.

6. CONCLUSÕES

Pelas condições climáticas e edofológicas observadas, e pelos resultados obtidos, chegou-se as seguintes conclusões:

- A irrigação com efluente anaeróbio mostrou-se vantajosa, tanto sob o aspecto sanitário com o agrícola, resultando em um melhor desenvolvimento e produção da cultura.
- Os metais presentes no esgoto doméstico bruto, não são eliminados no tratamento anaeróbio, por isso continuam presentes na efluente secundário, e conseqüentemente são absorvidos pela planta; atingindo níveis acima do Limite Máximo de Tolerância (ANVISA, 1965).
- As concentrações de metais nas plantas submetidas à aplicação com efluente foram mais elevadas do que as plantas irrigadas com água.
- Na aplicação com água a absorção de metais está diretamente relacionada ao volume aplicado.
- As plantas que tiveram maior concentração de metais receberam aplicação de efluente com volume de 180 L.

- A alta concentração de Cromo e Níquel nas folhas pode estar relacionada com a maior absorção desses elementos por essa parte da planta.
- O elemento Cromo tem concentração maior quando o volume aplicado é de 120L tanto, nas folhas como na espiga e, portanto, não está proporcional com o volume aplicado.
- A alta concentração de Níquel nas folhas irrigadas com efluente, com o volume de 120L, pode estar relacionada com uma provável contaminação.
- A concentração de Zinco não está relacionada com o volume aplicado.
- A alta concentração de Chumbo nas espigas irrigadas com água, chama a atenção para uma possível contaminação desta.
- Os metais de uma maneira geral causam danos à saúde humana. Os elementos que apresentaram concentração acima do Limite Máximo de Tolerância provocam danos.
- Uma maior fiscalização junto a Estação de Tratamento, visando a busca de fábricas clandestinas de jóias e outros materiais, que fazem uso de uma maneira geral, de metais, poderia resultar em uma análise mais positiva da pesquisa em questão.

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AINGINGER, H.; WOBRAUSCHEK, P.; STRELI, C. Principles and development of total reflection x-ray fluorescence analysis. **Analytical Sciences**, Japão, 1995, v.11.

ANGELAKIS, A. N. Status of wastewater reuse practice in the Mediterranean basin: need for guidelines. **Water Research**, 33(10): 2201-2217, 1999.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13969. Tanques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**, 1997, p. 6.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7229. Projeto, construção e operação de tanques sépticos**, 1993, p. 15.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Decreto nº 55.871, de 26 de março de 1965. Disponível em:<http://www.anvisa.gov.br/legis/decretos/55871_65.htm.>Acesso em: 19 out. 2003.

BRITO, L.T.L. Recursos Hídricos: pontos para reflexão. EMBRAPA – Semi-Áridos. Disponível em:<<http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/ecoagua/pric/rechidro/html>.>Acesso em: 02 out 2003.

- BÚLL, L.T. e CANTARELLA, H. **Cultura do Milho: Fatores que afetam a produtividade.** Piracicaba: POTAFOS, 1993, p. 301.
- BETTIOL, W e CAMARGO, O. A. **Impacto Ambiental de uso Agrícola do Lodo de Esgoto.** EMBRAPA - Meio Ambiente. Jaguariúna, SP, 2000, p. 312.
- CAMARGO, S.A.R. **Filtro anaeróbio com enchimento de bambu para o tratamento de esgotos sanitários: avaliação da partida e operação.** 2000. 181p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos domésticos por processo anaeróbio e disposição controlada no solo.** Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 464.
- CETESB. **Relatório de estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo.** São Paulo, 2001. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em 08 nov. 2001.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios.** Belo Horizonte: DESA, UFMG, 1997, p. 246.
- CORAUCCI FILHO, B.; SIVIERO, R.A.; VIEIRA, D.B.; FIGUEIREDO, R.F.; ALBUQUERQUE, A.F.; MARQUEZINI, I.S. Aplicação no solo de água residuária cítrica contendo óleo essencial utilizando a técnica de irrigação por sulcos de infiltração. **In: I Simpósio Latino Americano de Tratamiento y Reuso del Agua y Resíduos Industriales.** Cidade do México-DF, México, 1998. Anais, Cidade do México-DF, México, 1998. UNAM/AMISA, Tomo I, v. I, p. 4-23.
- DARWISH, M. R. Economic Environmental Approach for Optimum Wastewater Utilization in Irrigation: A Case Study in Libanon. **Applied Engineering in Agriculture**, 15: 41-48, 1999.

FEACHEM, R.G.; BRADLEY, D.J.; GARCLICK, H.; MARA, D.D. Health aspects of excreta and sullage management – a state of the art review. **Appropriate Technology for Water Supply and Sanitation**, Washigton, DC. The World Bank, v.3, dez 1980.

FRIEDLER, E. Jeezrael Valley project for wastewater reclamation and reuse, Israel. **Water Science and Technology**, 40(4): 347-354, 1999.

GHEYI, H.R.; KÖNIG, A.; CEBALLOS, B.S.O.; DAMASCENO, F.A.V. **Tratamento e Uso de Águas Residuária**. Campina Grande: UFPB, 1999, p.110.

HARUVY, N. Wastewater irrigation decision making: farm sector interests versus the nation's. **Internacional Water & Irrigation Review**. 17(4): 24-26, 1997.

HERNANDEZ, F.B.T. e ALMEIDA FILHO, A. Água nova realidade. **A Voz do Povo**, Ilha Solteira, ano I, n.28, p. 3, 2001.

HESPANHOL, I. Aspectos técnicos e de saúde pública relativos ao uso de esgotos na agricultura e aquacultura. In: **Encontro Internacional Sobre o Desenvolvimento da Década da Água**. Lisboa, Portugal: 19 a 22 abril de 1998. Governo de Portugal, República Federal da Alemanha, PNUD, OMS, 1988, p.68.

IAEA. **Quantitative X-ray Analisis System (QXAS) software package**, Viena.

JANSSENS, K.; ADAMS, F.; VEKEMANS,B.; VINCZE, L.; VAN ESPEN, P. Analysis of x-ray spectra by interative least squares (AXIL): new developments. **X-Ray Spectrometry**, 23: 278-285, 1994.

KLOCKENKÄMPER, R.; VON BOHLEN, A. Elemental analysis of environmental samples by total reflection x-ray fluorescence: a review. **X-Ray Spectrometry**, 25(4): 156-162, 1996.

- KLOCKENKÄMPER, R.; KNOTH, J.; PRANGE, A.; SCHWENKE, H. Total reflection x-ray fluorescence spectroscopy. **American Chemical Society**, 64(23): 1115A-1123A, 1992.
- KÖNIG, A.; CEBALLOS, B. S. O.; SANTOS, A. V.; CAVALCANTE, R. B.; ANDRADE. Uso de esgoto tratado como fonte de água não convencional para irrigação de forrageiras. **In: 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Foz do Iguaçu: ABES, 1997, 1 CD.
- KOOPMANN, C.; PRANGE, A. Multielement determination in sediments from the German Wadden Sea - investigations on sample preparation techniques. **Spectrochimica Acta B**. 46(10): 1395-1402, 1991.
- LADISICH ET, W.; STRELI, C.; WOBRAUSCHEK, P.; AIGINGER, H.; RIEDER, R. Total reflection XRF of light elements using various excitation sources. **Advances in X-ray Analysis**. 37: 577 - 588, 1994.
- LOPES, J. R. **Jornal Folha de São Paulo**. São Paulo, S.P. 2002
- LNLS. Disponível em: <<http://www.lnls.br/>>. Acesso em 15 de out. de 2000.
- MARA, D. D.; PEARSON, H.W. A hybrid waste stabilization pond and wastewater storage and treatment reservoir system for wastewater reuse for both restricted and unrestricted crop irrigation. **Water Research**, 33(2): 591-594, 1999.
- MARA, D.; CAIRNCROSS, S. **Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture, measures for public health protection**. Geneva, Switzerland, 1989.
- NOGUEIRA, P.F. **Escassez de Água**. Disponível em: < <http://www.uniagua.org.br/default.asp?tp=3&pag=reuso.htm>.> Acesso em 30 set. 2003

- PEARSON, H.W. The reuse of waste stabilization pond effluents for aquaculture and sgriculture. In: **Seminário Regional de Investigation sobre Lagunas de Estabilizacion**. Lima: CEPIS-OMS/OPS, 1986, p. 89-99.
- PEREZ, C. A. et alli. Synchrotron radiation x-ray fluorescence at the LNLS: beamline instrumentation and experiments. **X-Ray Spectrometry**. 28: 320-326 , 1999.
- PESCOD, M.B. **Wasterwater and use in agriculture**. Rome: FAO. 1992 (FAO Irrigation and Drainage Paper 47)
- PETERS, G.; DIEZI, J.; GUIGNARD, J.P. Renal Adaptation to Nephron Lass. **Economic and Technical Review Report**. S. Karger, New York, 1979.
- PINTO, J. F; S. M. SIMABUCO – Aplicação da técnica de fluorescência de raios X dispersiva em energia para biomonitoramento ambiental pela análise de folhas de *Nerium oleander* e *Rhododendrom ferrigineum*. In: **Avances en Análisis por Técnicas de Rayos X**. Vol XI, 223 – 228, 2000.
- PROSAB – Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbico e Disposição Controlada no Solo**. Coordenador – José Roberto Campos. São Carlos, São Paulo, 2000.
- RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996, p. 285 (Boletim Técnico 100).
- REBOUÇAS, A. C. Impactos ambientais nas águas subterrâneas. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 7, 1992, Belo Horizonte. Anais. Belo Horizonte: ABAS, 1992, p. 245.
- REYEZ, O. Low-strength wastewater treatment by a multistage anaerobics filter pached with waste tyre rubber. **Bioresource Technology**, 70: 55-60, 1999.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em: <
http://www.sabesp.com.br/sabesp_ensina/avancado/reuso_planejado/default.htm> Acesso
em 20 de set. **2003**.

SANEPAR – **Revista Técnica Sanepar** – Companhia de Saneamento do Paraná. n 12. Paraná,
1999.

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná. Disponível em: <http://www.sanepar.com.br>
Acesso em 20 de set. 2003.

SCHWENZE, H. and KNOTH, J. Handbook on x-ray spectrometry. **Practical Spectroscopy
Series**, v. 14. Marcel Decker, New York, 1993.

SHELEF, G. Wastewater Reclamation and Water Resources Management. **Water Science and
Technology**, 24(9), p. 251-265, 1991.

SILVA, R. S. P. **Reuso do Efluente Doméstico de um Filtro Anaeróbio Utilizando um
Sistema de Irrigação por Sulcos**. 2003. 126p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de
Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SIMABUCO, S. M. **Emprego da Fluorescência de Raios X por Dispersão de Energia no
Estudo da Dinâmica da Vinhaça no Solo**. 1993. 133p. Tese de Doutorado – Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SIMABUCO, S. M., e V. F. NASCIMENTO FILHO - Análise quantitativa por fluorescência de
raios X com dispersão de energia em amostras de água e efluentes industriais. **Anais do V
Congresso Geral de Energia Nuclear**, Rio de Janeiro, p. 841 - 845, 1994.

- SIMABUCO, S. M; MATSUMOTO, E. - Total reflection with synchrotron radiation (SR-TXRF) for rainwater analysis. **American Institute of Physics Conference Proceedings**, 576, p. 715 – 719, 2001.
- STEFANUTTI, R.; PACKER, A.P.; CORAUCCI FILHO, B.; MATTIAZZO, M.E.; FIGUEIREDO, R.F. Accumulation of Metals in the Soil of an Overland Flow Wastewater Treatment System. **J. Environ Monit**, 4: 1-6, 2002.
- TERADA, M.; ZUCCOLO, A. C. F.; PAGANINI, W. DA SILVA – Tratamento de esgotos domésticos por disposição no solo com utilização de gramíneas. **Revista DAE**, v. 45, n. 142, Set/1985 – Ed. Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP – São Paulo, SP.
- USEPA. **Process desing manual for land treatment of municipal wastewater**. Cincinnati, 1981.
- USEPA. **The use of reclaimed water and sludge in food crop production**, 1992.
- VAN ESPEN, P.; NULLENS, H.; ADAMS, F. - A computer of x-ray fluorescence spectra. **Nuclear Instruments and Methods**, Amsterdam, 1942:243 - 250, 1977.
- VIEIRA, D. B. **Técnicas de Irrigação**. 2ª Edição, Ed. Globo. São Paulo, 1995.
- VIEIRA, D.B. Curs aprofitament agrícola dels recursos hidrics de lês conques. **Solsona: Universitat de Lleida**, 1999.
- VON SPERLING, M. **Disposição de Efluentes no Solo**. Belo Horizonte: DESE, UFMG, v.I, 2ª Edição Revisada, 1996.
- WHO. Healt for the use of wastewater in agricultures and aquaculture. **Technical Report Series No. 778**. WHO, Genebra, 1989.

8. ABSTRACT

VIEIRA, C.B. Study of metals absorption in corn culture irrigated with domestic sewage employing Synchrotron Radiation Total Reflection X-Ray Fluorescence (SR-TXRF). 2004. (139 p). Dissertation (Master's Degree). College of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, Campinas State University, Campinas, Brazil.

The use of the secondary effluent of a domestic sewer in agriculture has been developed significantly in last decades. On conditions that our country, is promising the utilization of effluents of a domestic sewage, seeking the reutilization of the nutrients original of decomposition of the organic material.

The application of the system irrigation which use infiltration technique by flat furrows as post treatment of effluents of anaerobic filters can be use in different cultures, connecting the approaches of the Sanitary Engineering to the Irrigation Engineering.

For this, the monitoring and the environmental control claim analytic techniques able to determine several elements, among them the metals are subjects of especial interest, seen that these have toxics effects in the human been.

In such case, the mainly aim of this work was evaluate the absorption of metals originating from the domestic sewage applied through an irrigation system by infiltration furrows. For this the corn culture (AG 405-AGROCERES) was submitted two different treatments: irrigation with domestic sewage and water.

After the vegetative growth the plants collected were divided in two parts: grains and leaf. The different parts were submitted to a digestion procedure in open system and analyzed by Synchrotron Radiation Total Reflection X-Ray Fluorescence (SR-TXRF).

It was observed that metal concentrations in the plants submitted to domestic sewage irrigation were higher than water irrigation. The results indicated that metal absorption, in leaf and spikes, is directly related with the application rate in case of water irrigation. But for domestic sewage irrigation was observed a highest absorption of metals, for leaf and grains, when a plant was irrigated with a 180 L rate, as such as for leaf and spikes.

Key Words: Domestic sewage, Metal absorption, Corn, Synchrotron Radiation, X-Ray Fluorescence, Total Reflection

Anexos

Anexos A – Localização

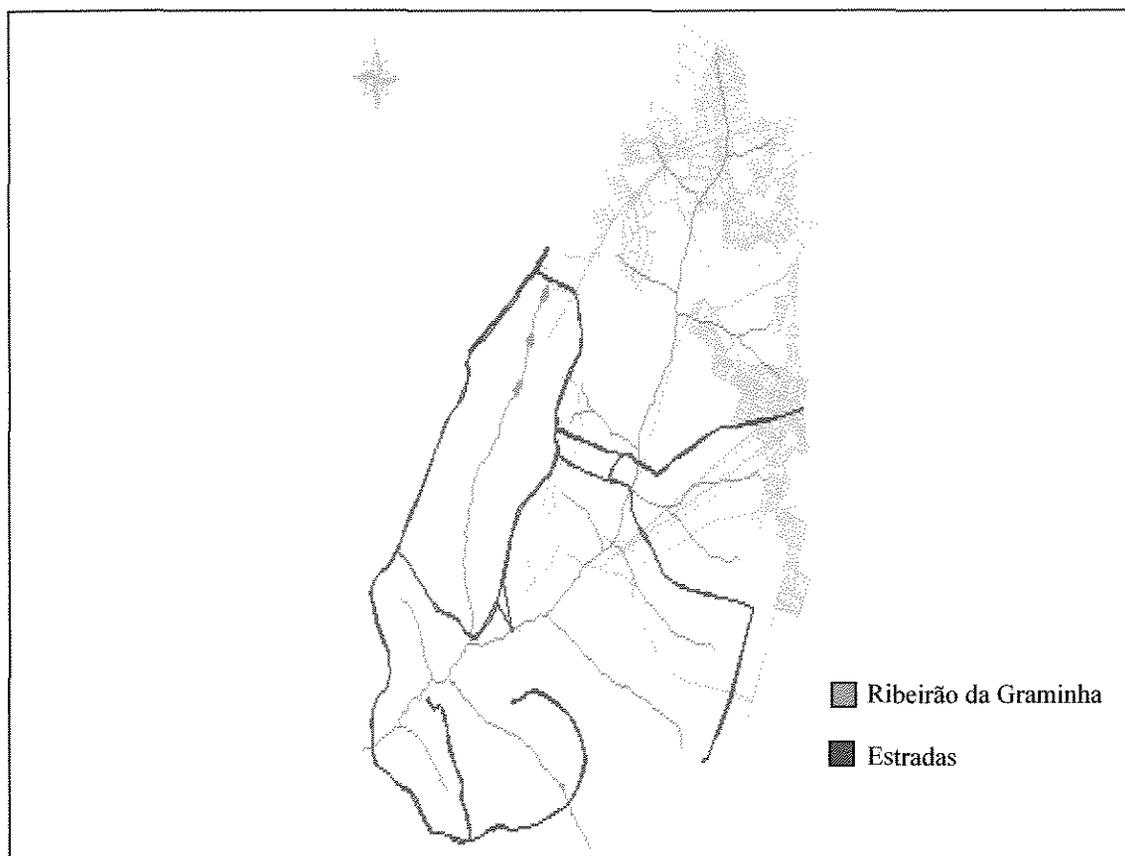


Figura A. 1 – Mapa do Ribeirão Graminha, que pertence a Bacia do Rio Piracicaba.

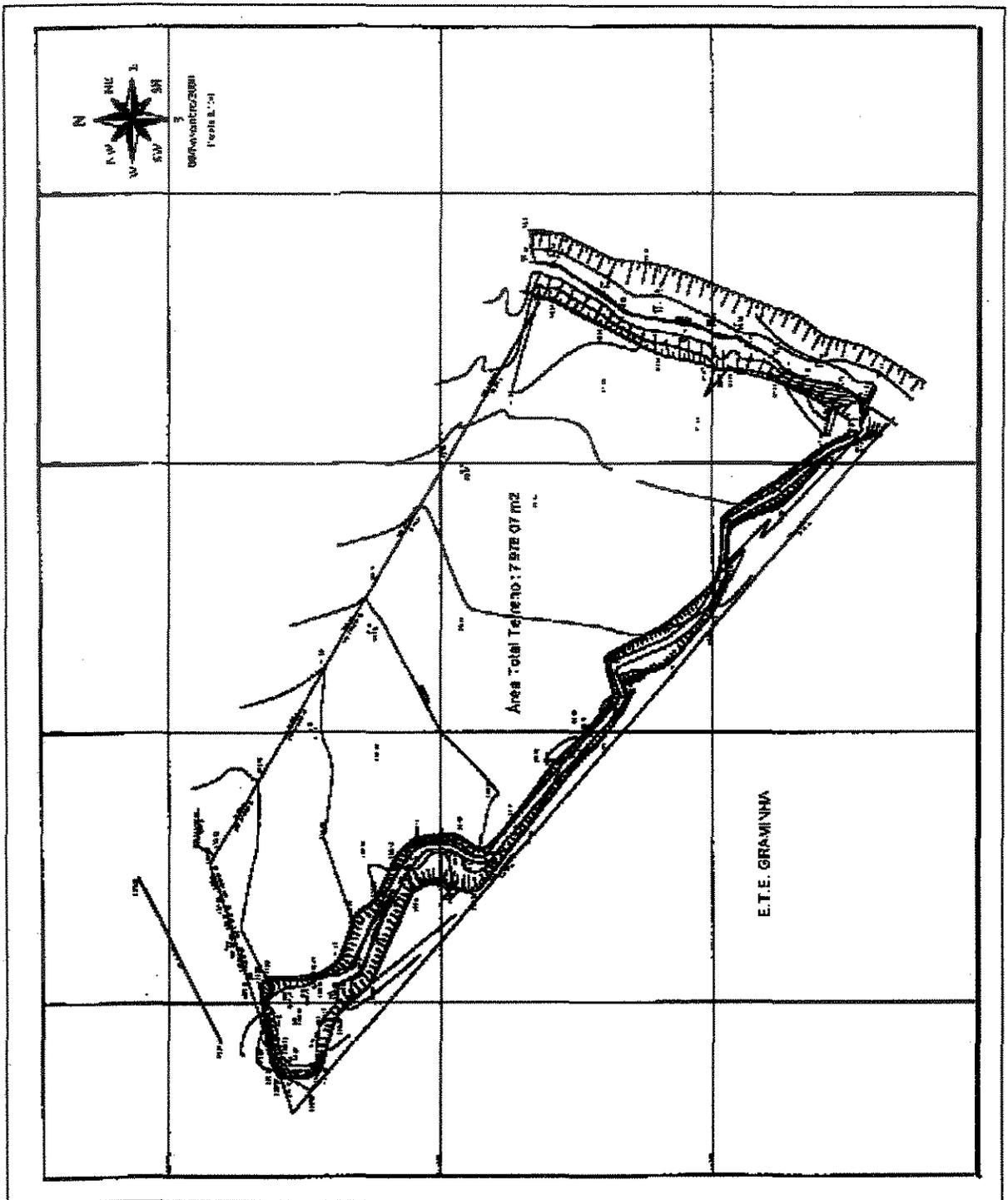


Figura A. 2 – Levantamento topográfico da área experimental, realizado em terreno natural. Fonte adaptado de SILVA, 2003.

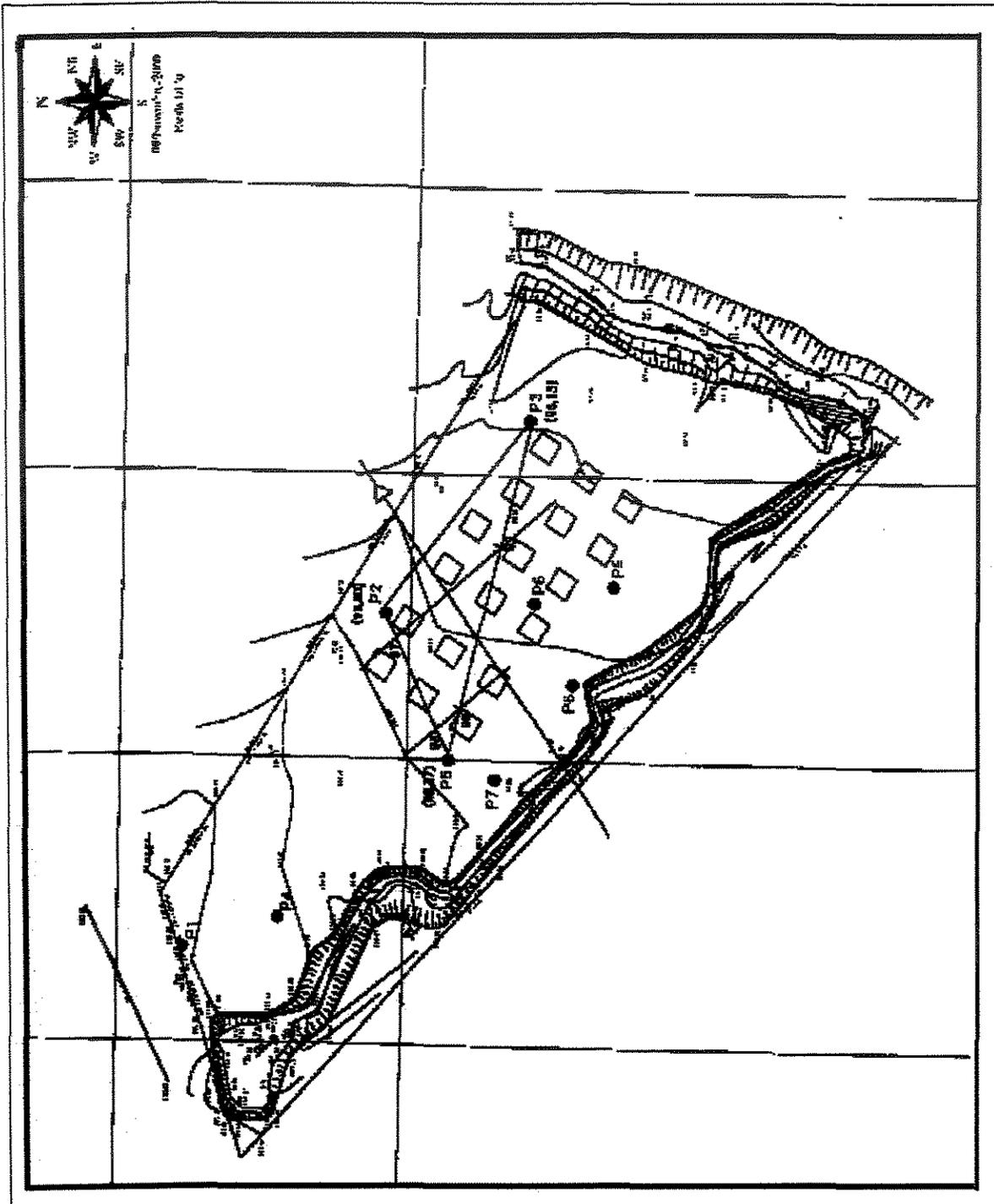


Figura A.3 – Indicação do escoamento do lençol freático. Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

Anexos B – Dados do Projeto de Irrigação

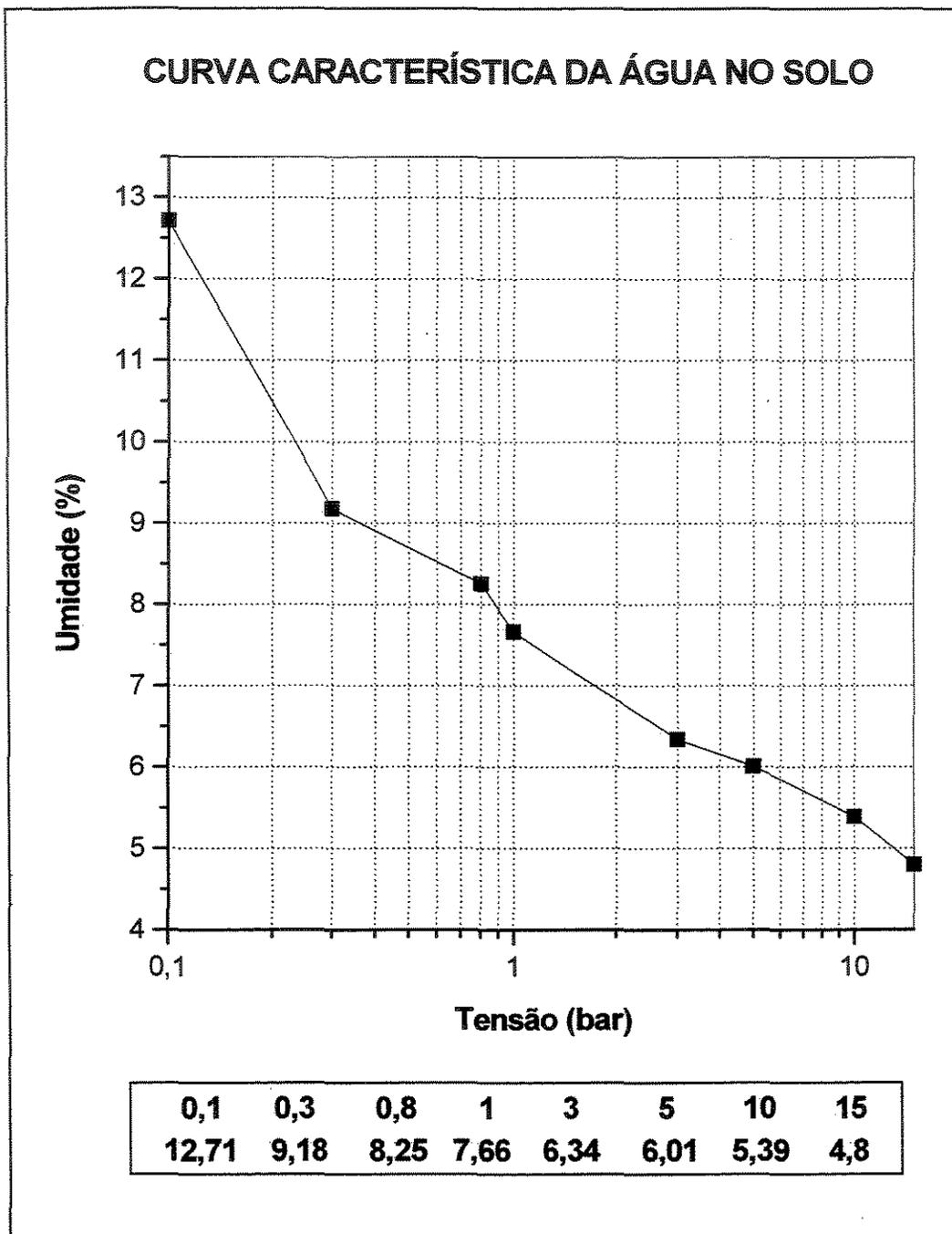


Figura B.1 – Curva característica da água no solo, para a camada 0 a 25 cm, referente ao solo natural.

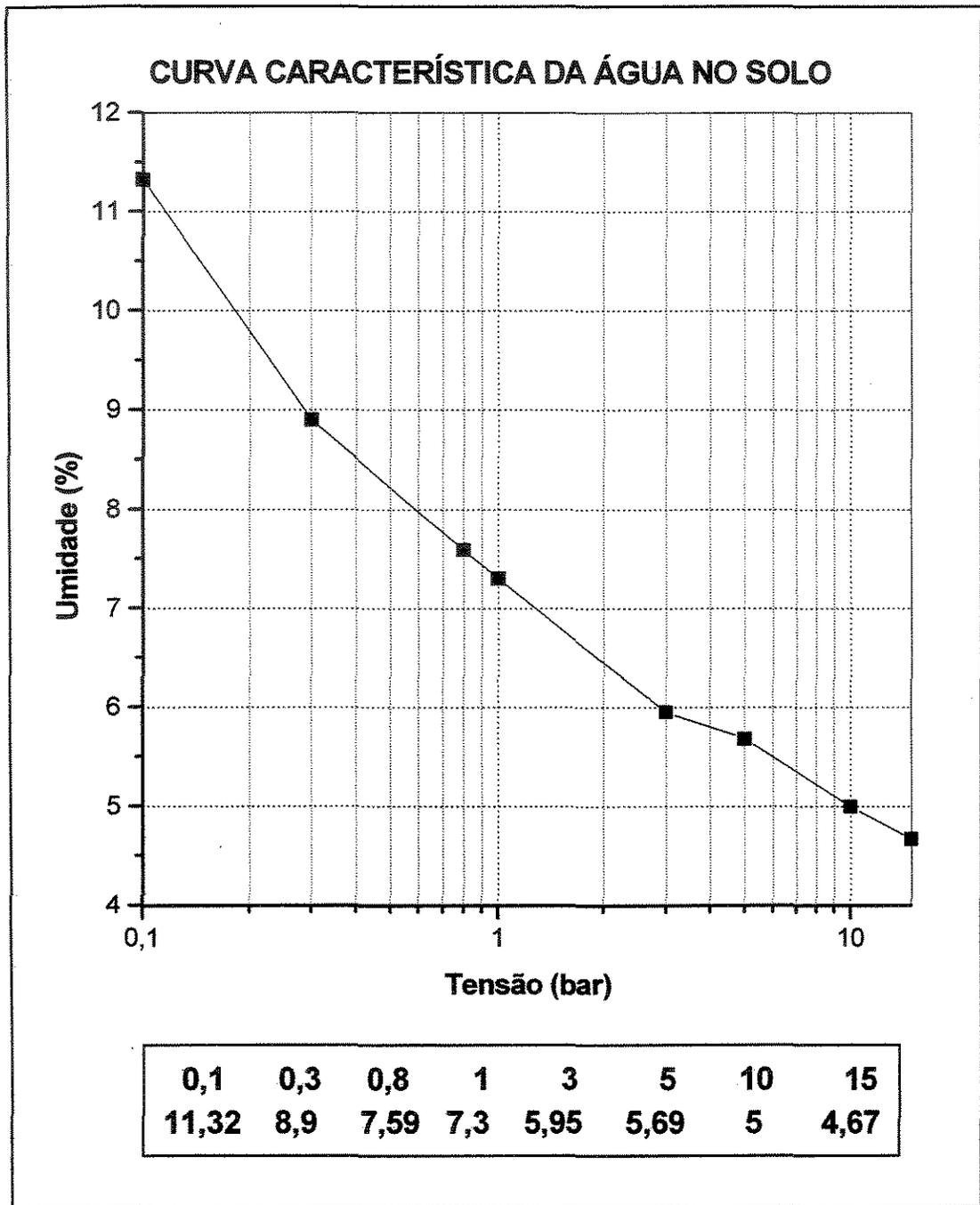


Figura B.2 – Curva característica da água no solo, para a camada de 25 a 50cm, referente ao solo natural.

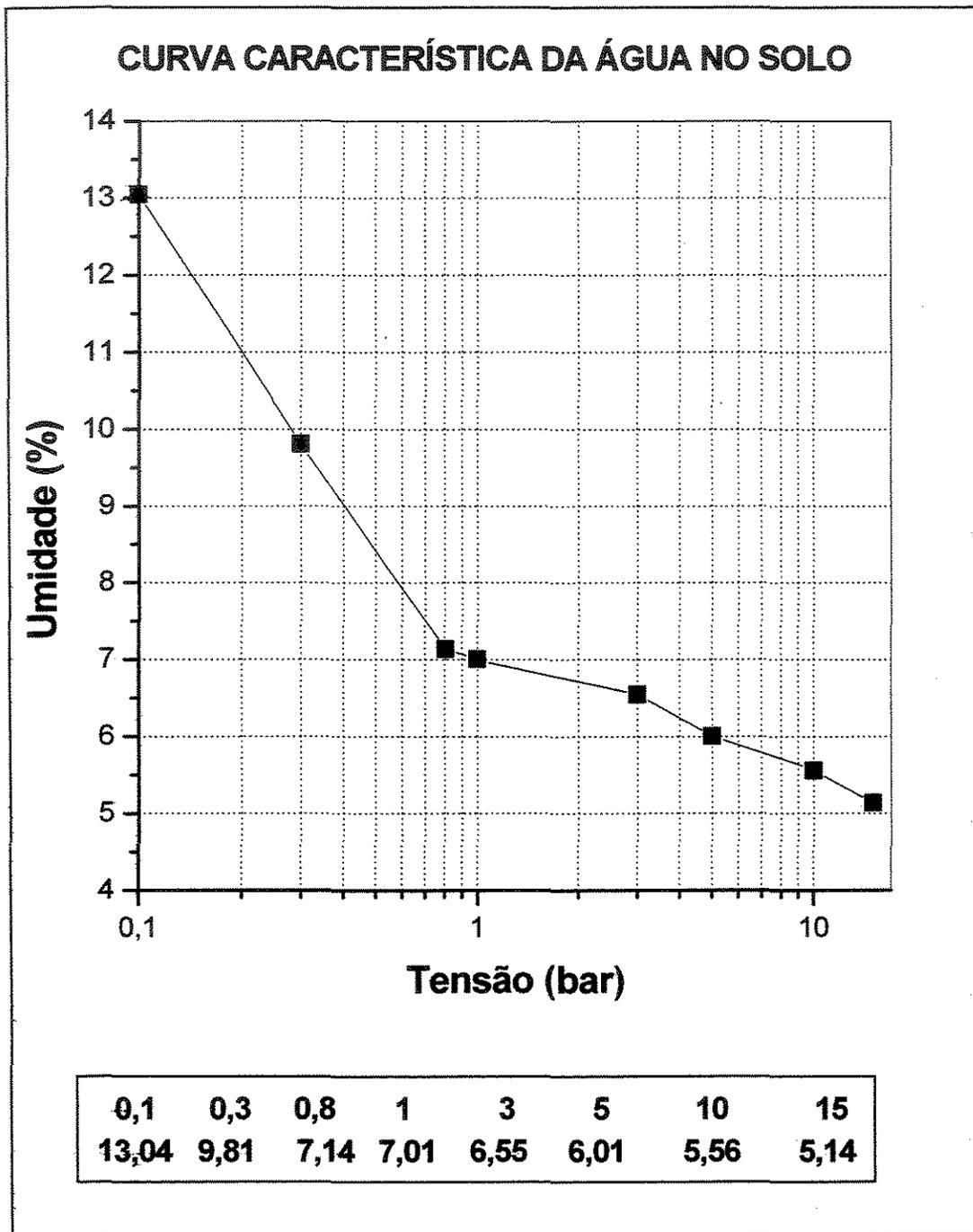


Figura B.3 – Curva característica da água no solo, para camada 50 a 75 cm, referente ao solo natural.

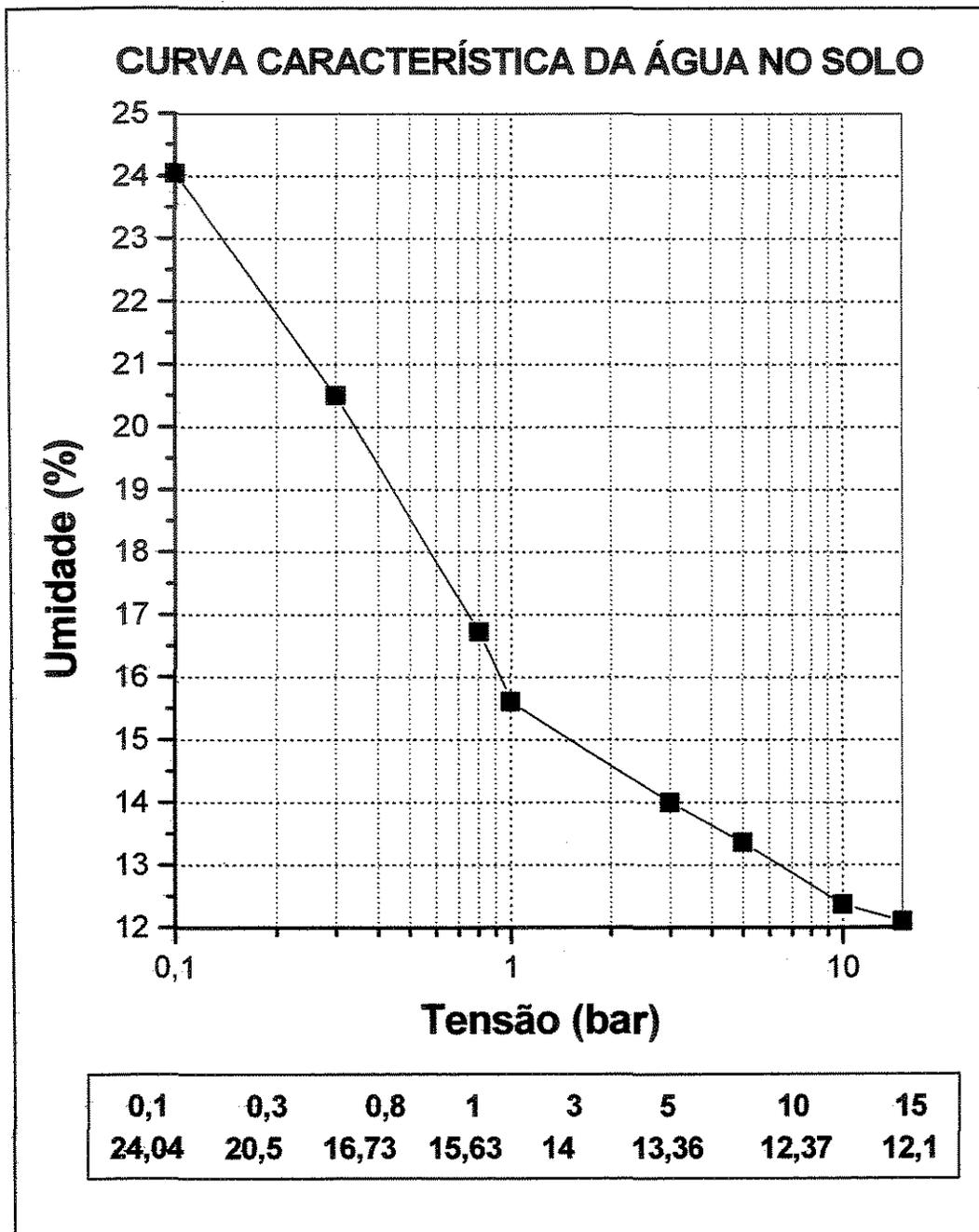


Figura B.4 – Curva característica da água no solo, para camada 75 a 100cm, referente ao solo natural.

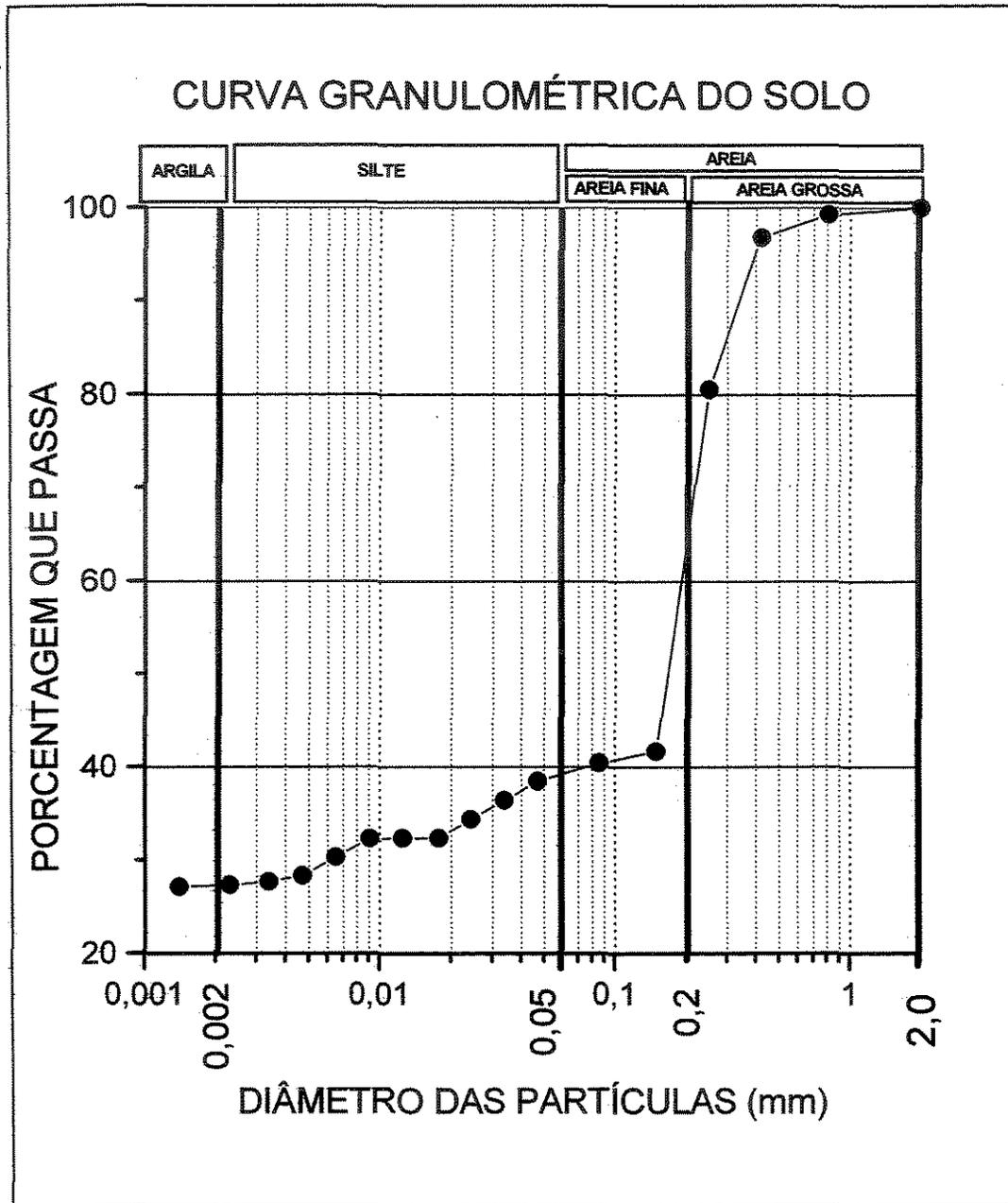


Figura B.5 – Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 0-25 cm. Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

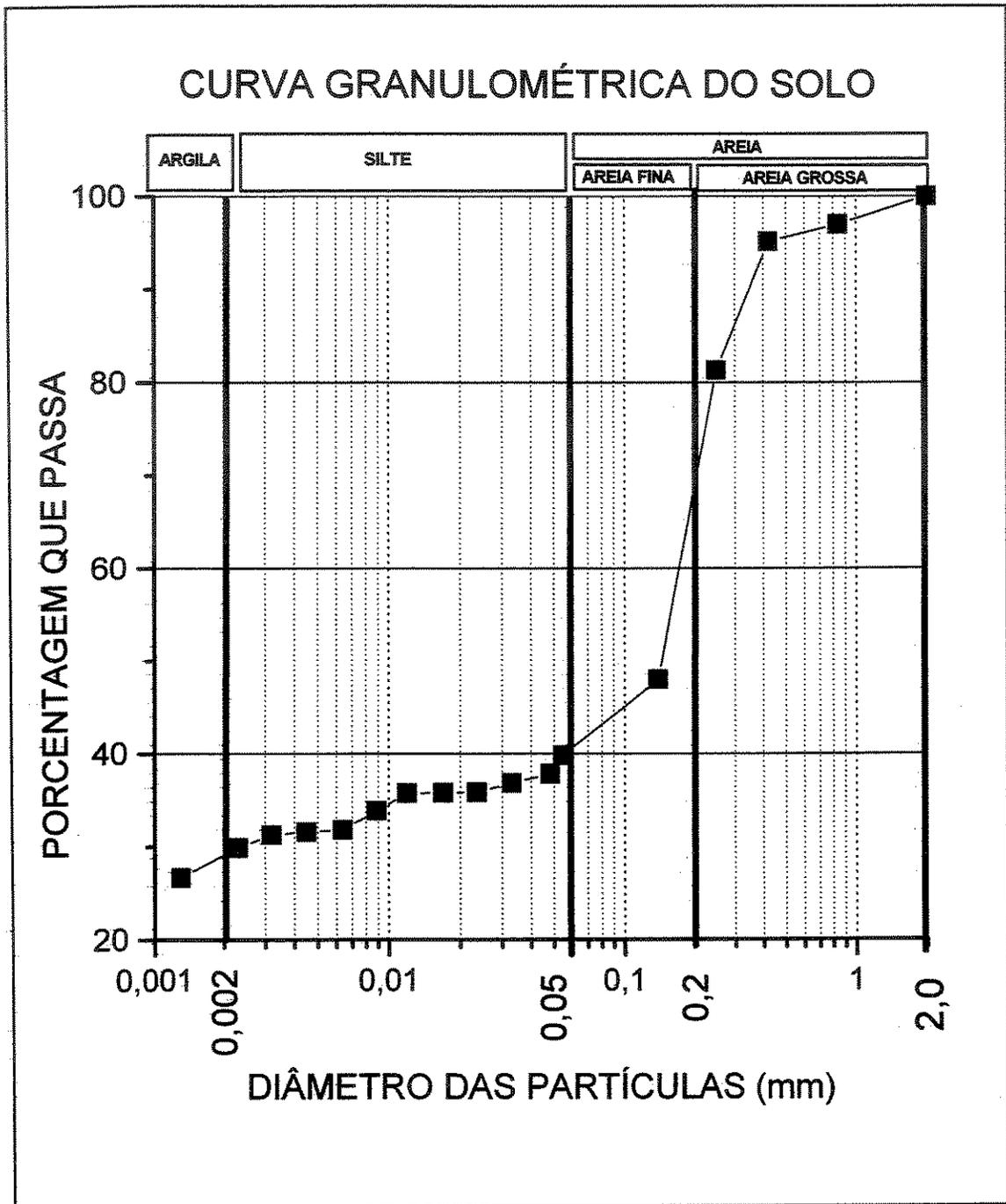


Figura B.6 – Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade de 25-50 cm. Fonte: adaptado de SILVA, 2003

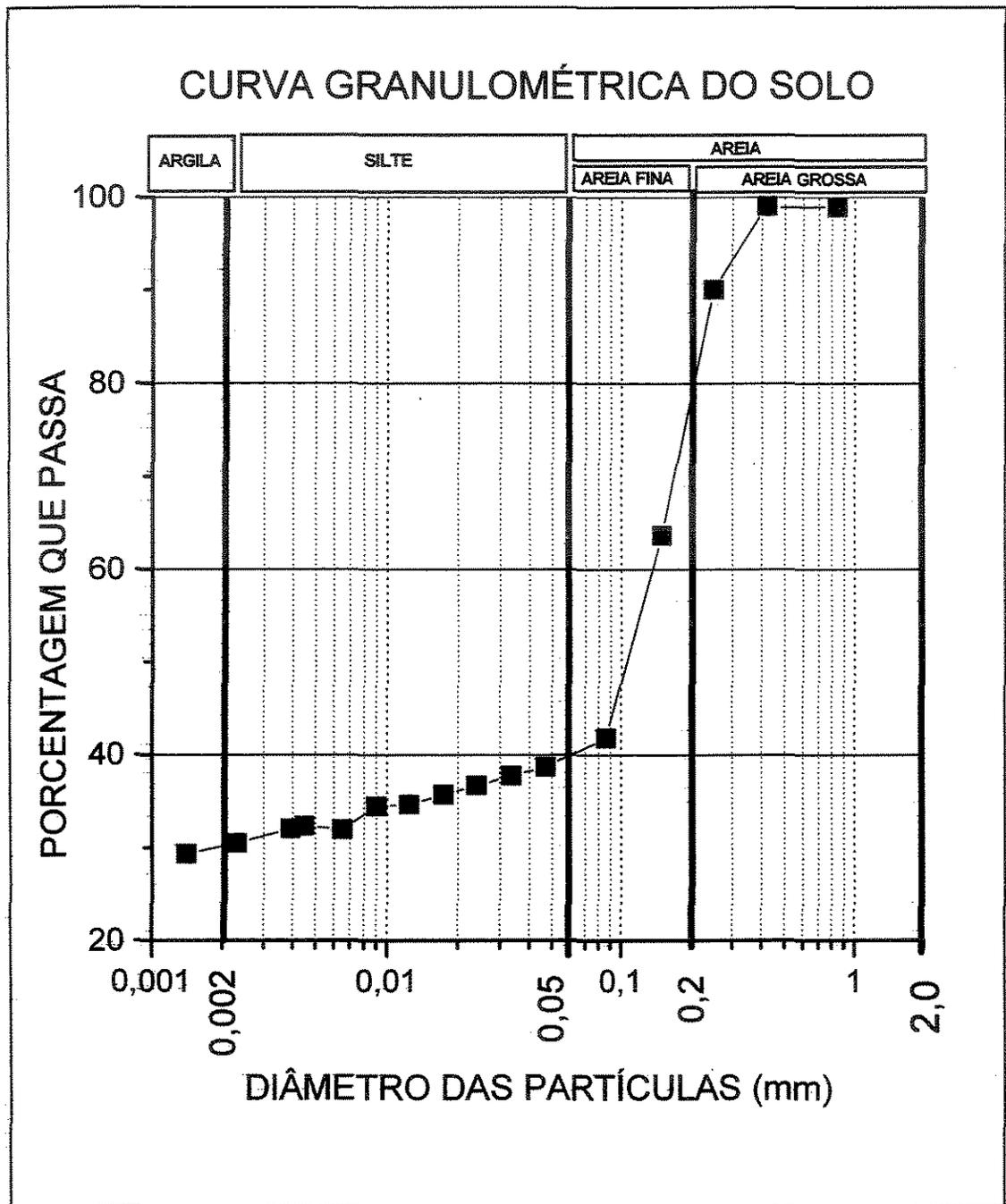


Figura B.7 – Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade 50-75 cm. Fonte: adaptado de SILVA, 2003.

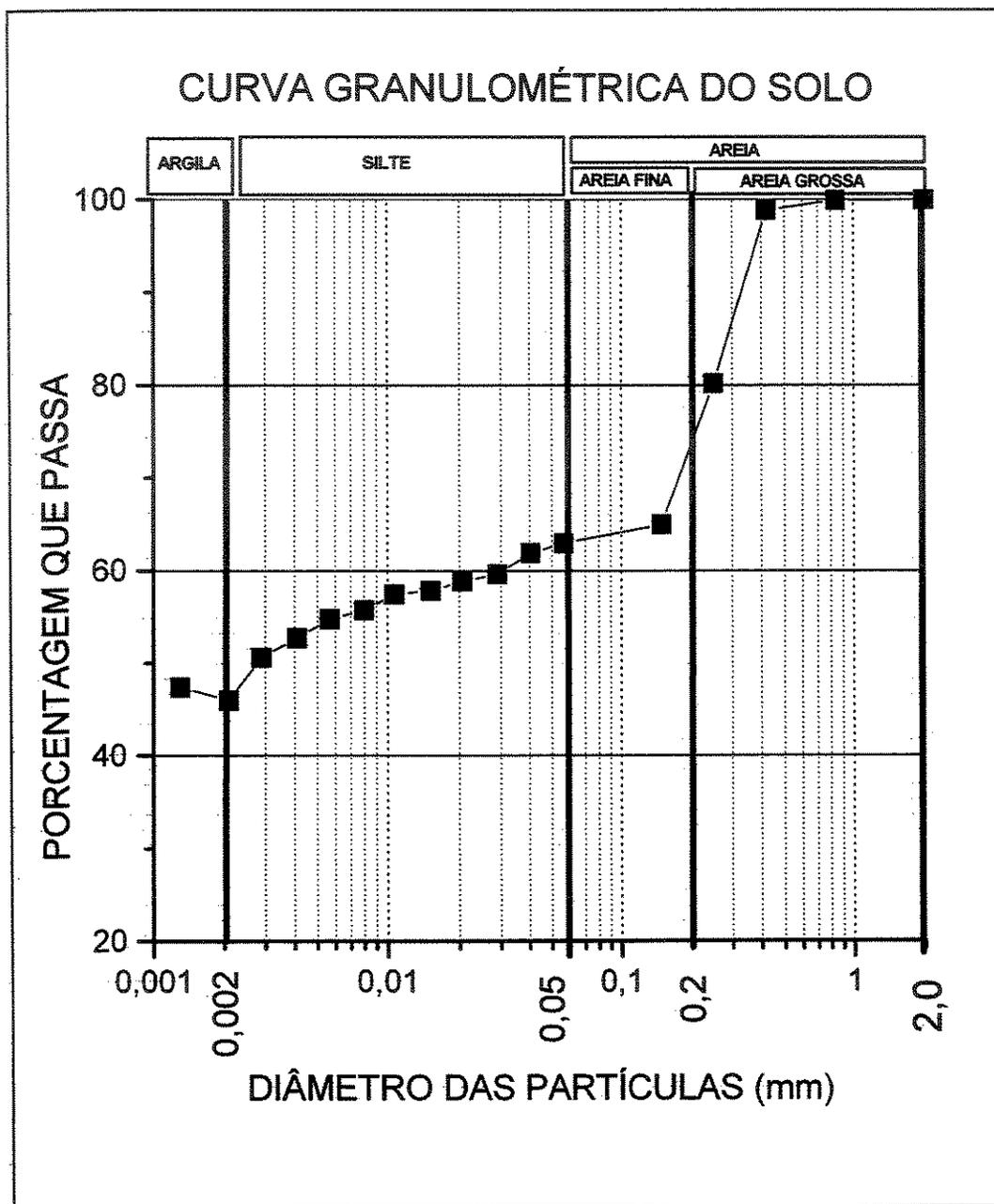


Figura B.8 – Curva granulométrica do solo em seu estágio natural, na profundidade 75-100cm. Fonte: adaptado de SILVA, 2003

Tabela B.1 – Apresentação dos dias de irrigação, de precipitação, das lâminas hídricas aplicadas e do volume aplicado na safra.

Ciclo	Dia	Data	Precipitação (mm)	Efluente (mm)						
				20cm		40cm		60cm		
				Hi (mm)	V (L)	Hi (mm)	V (L)	Hi (mm)	V (L)	
Estágio Inicial	1	Seg	21/03/01							
	2	Ter	22/03/01							
	3	Qua	23/03/01		14,8	60	14,8	60	14,8	60
	5	Sex	25/03/01							
	6	Sab	26/03/01	52,3						
	7	Dom	27/03/01	3,1						
	8	Seg	28/03/01	4,2						
	9	Ter	29/03/01	16,7						
	10	Qua	30/03/01							
	12	Sex	01/04/01							
	13	Sab	02/04/01	48,9						
	14	Dom	03/04/01							
	20	Sab	09/04/01		14,8	60	14,8	60	14,8	60
	21	Dom	10/04/01							
22	Seg	11/04/01		14,8	60	14,8	60	14,8	60	
23	Ter	12/04/01	6,2							
27	Sab	16/04/01								
28	Dom	17/04/01								
33	Sex	22/04/01								
34	Sab	23/04/01	2,5							
35	Dom	24/04/01								
37	Ter	26/04/01								
38	Qua	27/04/01		14,8	60	14,8	60	14,8	60	
39	Qui	28/04/01								
46	Qui	05/05/01								
47	Sex	06/05/01								
48	Sab	07/05/01		14,8	60					
49	Dom	08/05/01								
50	Seg	09/05/01								
51	Ter	10/05/01				28,8	120			
52	Qua	11/05/01		14,8	60					
53	Qui	12/05/01								
54	Sex	13/05/01								
55	Sab	14/05/01						45,4	180	
56	Dom	15/05/01	39,5							
57	Seg	16/05/01								
58	Ter	17/05/01	2,3							
59	Qua	18/05/01	11,9							
60	Qui	19/05/01								
68	Sex	27/05/01								
69	Dom	28/05/01	7,9							
70	Seg	29/05/01								

Anexos C – Limites de Tolerância e Danos À Saúde

Tabela C.1 - Limites Máximos de Tolerância para Contaminantes Inorgânicos em Alimentos (ANVISA, 1965).

Contaminante Inorgânico	Alimentos em que podem ser encontrados	Limite Máximo de Tolerância LMT (ppm)
Antimônio	Bebidas alcoólicas fermentadas	0,20
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	0,20
	Refrescos e refrigerantes	0,20
	Sucos de frutas e xaropes naturais	1,00
	Outros alimentos	2,00
Arsênio	Bebidas alcoólicas fermentadas	0,20
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	0,10
	Refrescos e refrigerantes	0,20
	Sucos de frutas e xaropes naturais	0,50
	Outros alimentos	1,00
Cádmio	Bebidas alcoólicas fermentadas	0,50
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	0,20
	Refrescos e refrigerantes	0,20
	Sucos de frutas e xaropes naturais	0,50
	Outros alimentos	1,00
Cobre	Bebidas alcoólicas fermentadas	5,00
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	10,00
	Refrescos e refrigerantes	5,00
	Sucos de frutas e xaropes naturais	30,00
	Outros alimentos	30,00
Cromo	Qualquer alimento	0,10
Estanho	Qualquer alimento	250,00
Mercúrio	Peixes, crustáceos e moluscos	0,50
	Qualquer outro alimento	0,01
Níquel	Bebidas alcoólicas fermentadas	0,10
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	3,00
	Refrescos e refrigerantes	0,10
	Sucos de frutas e xaropes naturais	3,00
	Produtos hidrogenados	4,00
	Outros alimentos	5,00
Selênio	Alimentos sólidos	0,30
	Alimentos líquidos	0,05

Continuação da tabela C.1

Zinco	Bebidas alcoólicas fermentadas	5,00	
	Bebidas alcoólicas fermento-destiladas	5,00	
	Refrescos e refrigerantes	5,00	
	Sucos de frutas e xaropes naturais	25,00	
	Outros alimentos	50,00	
Chumbo	Origem animal	"in natura"	Industrializado
	Carnes	0,50	1,00
	Aves	0,20	1,00
	Pescado	2,00	2,00
	Leite	0,05	0,05
	Derivados do leite:		
	queijo	-	1,00
	manteiga	-	0,10
	outros	-	0,20
	Ovos	0,10	0,20
	Origem vegetal		
	Bulbos	0,50	0,50
	Raízes e tubérculos	0,50	0,50
	Cereais	0,50	0,50
	Hortaliças	0,50	0,50
	Leguminosas	0,50	0,50
	Frutas (exceto sucos, néctares, cristalizadas ou glaceadas)	0,50	0,50
	Sucos e néctares de frutas	-	0,40
	Frutas cristalizadas ou glaceadas	-	1,00
	Oleaginosas	0,20	0,20
	Específico		
	Óleos e gorduras	-	0,10
	Margarina	-	0,10
	Refrescos e refrigerantes	-	0,20
	Bebidas alcoólicas	-	0,50
	Cacau (exceto manteiga de cacau e chocolate adoçado)	-	2,00
	Manteiga de cacau	-	0,50
	Chocolate adoçado	-	1,00
	Chocolate não adoçado	-	2,00
	Açúcar (sacarose)	-	2,00
	Dextrose (glicose)	-	2,00
	Frutose	-	0,50
	Xarope de glicose	-	2,00
Lactose	-	2,00	
Café torrado e moído	-	1,00	
Alimento infantil	-	0,20	
Caseína e caseinatos	-	2,00	
Outros	0,80	0,80	

Tabela C.2 – Efeitos causados à saúde pelos metais (CETESB, 2001).

Elemento	Efeitos causados à saúde humana
Alumínio	A principal via de exposição é pela ingestão de alimentos e água. A osteomalacia é observada em humanos expostos ao alumínio. Há considerável evidência que o alumínio é neurotóxico. O acúmulo de alumínio no homem tem sido associado ao aumento de casos de demência senil do tipo Alzheimer.
Arsênio	Intoxicação crônica resulta em desordens neurológicas, fraqueza muscular, perda de apetite, náuseas, hiperpigmentação e queratoses. Exposição ocupacional são reportados em fundições, onde o alto nível de arsênio inorgânico encontrado no ar, pode provocar lesões nas membranas mucosas do sistema respiratório, incluindo perfurações do septo nasal. Há suspeitas de ser carcinogênico.
Bário	O bário é acumulado por organismos, passado através da cadeia alimentar, mas não é concentrado. A principal via de exposição humana é a ingestão de água e alimentos. Exposição aguda resulta em náuseas, vômitos e diarreias, seguido por estimulação muscular. Podem ocorrer gastroenterites, perda de reflexos e paralisia muscular. Foi diagnosticado em trabalhadores e residentes nas proximidades de um aterro contendo bário, um aumento de distúrbios respiratórios, gastrointestinais e problemas com pele. Não há evidências de carcinogenicidade.
Cádmio	Exposição aguda por inalação de óxido de cádmio resulta em pneumotites agudas com edema pulmonar, podendo ser letal, e por ingestão de sais de cádmio solúvel causa gastroenterites agudas Também pode provocar náuseas, vômitos, salivação e caimbra. Casos severos podem mostrar injúrias no fígado, convulsões, choques, problemas renais e depressões cardiopulmonares podendo levar a morte. Não há uma firme conclusão sobre efeito carcinogênico.
Chumbo Inorgânico	Os efeitos crônicos produzem sintomas de perda de apetite, constipação, anemia, fraqueza, cólicas e dores musculares e nas juntas, hipertensão, disfunção renal, mal formações congênitas, diminuição da quantidade de espermatozoides e danos ao sistema nervoso central e periférico afetando principalmente a camada de mielina das fibras motoras. Não há indícios de carcinogenicidade.
Cobalto	Exposição aguda pode levar a depressão da absorção de iodo, anorexia, náuseas, vômitos e diarreia. Sintomas neurotoxicológicos incluem dor de cabeça e mudanças nos reflexos. Exposição crônica podem provocar a completa perda do olfato, problemas gastrointestinais, dilatação do coração, trombose secundária, aumento dos eritrócitos no sangue, e diminuição de absorção de iodo pela tireóide. Não existe nenhuma evidência de carcinogenicidade ao ser humano.

Continuação da tabela C.2.

Cobre	Existem poucos casos reportados para efeitos agudos. O principal sintoma após a ingestão é a queimação epigástrica, náuseas, vômitos e diarreia. Podem ocorrer lesões no trato gastrointestinal e indução de anemia hemolítica. A inalação de cobre produz sintomas similares a silicose e dermatites de contato. Efeito crônico é raramente reportado, exceto para portadores do Mal de Wilson, doença congênita que provoca acúmulo de cobre no fígado, cérebro e rim resultando em anemia hemolítica, anormalidades neurológicas e córnea opaca.
Cromo	A principal via de exposição da população em geral é a ingestão de alimentos e água, enquanto na exposição ocupacional é a inalação, também podendo ocorrer dermatites por contato dermal. Os compostos de Cr6+ são mais tóxicos aos humanos do que o Cr3+. A exposição aguda ao Cr6+ produz náuseas, diarreias, danos no fígado e rim, hemorragias internas, dermatites e problemas respiratórios, enquanto que a exposição aguda ao Cr3+ raramente reflete em efeitos tóxicos. Exposição crônica geralmente estão associadas com alergias. Envenenamento por ingestão de cromo pode provocar necrose no fígado e rim. No caso de inalação (exposição ocupacional) pode provocar irritações do trato respiratório, ulceração ou perfurações no septo nasal. Também tem sido reportado, bronquite, rinite e pneumonia.
Manganês	A principal via de exposição humana é a inalação. A suscetibilidade individual aos efeitos tóxicos pela exposição ao manganês é bastante variável. A concentração mínima que produz efeitos adversos está entre 2 e 5 mg/m ³ . A inalação de grandes doses resulta em necroses pulmonares localizadas. Efeitos crônicos são observados em trabalhadores de mineração e processamento de minério de manganês, fundição e indústrias de bateria tipo "célula-seca" e soldas. O distúrbio é caracterizado por manifestações psicológicas e neurológicas. Sua ação no sistema nervoso central, afeta a função neurotransmissora, inicialmente provocando apatia, insônia, alucinações e anorexia, chegando com a continuidade da exposição a provocar rigidez muscular e tremores.
Mercurio Inorgânico	Nos seres humanos uma das principais vias de exposição é a ingestão de alimentos como os peixes. O efeito agudo geralmente é caracterizado por faringite, dores abdominais, náuseas, vômitos e diarreias sanguinolentas. Nefrites e hepatites podem ocorrer seguido de morte por lesões intestinais e renais. A dose letal varia de 29 a 50 mg/kg peso corpóreo. A exposição crônica pode provocar o Mal de Minamata. Em casos severos o cérebro torna-se atrófico com neuroses de neurônios. Exposição ocupacional ao mercúrio metálico tem sido associada com o desenvolvimento de proteinúria. Mercúrio inorgânico é geralmente considerado não carcinogênico.

Continuação da tabela C.2.

Níquel	A inalação é uma via importante de exposição ao níquel e seus sais em relação a riscos à saúde humana. A via gastrointestinal é de menor importância. O níquel está normalmente presente em tecidos humanos e sob condições de alta exposição, esses níveis podem crescer significativamente. A ocorrência de toxicidade aguda é rara. Exposição crônica pode provocar irritação de pele e olhos. Dermatites são um resultado comum à sua exposição, principalmente para mulheres. Rinite, sinusite, perfurações no septo nasal e asma têm sido reportados em exposição ocupacional de trabalhadores de refinaria e siderúrgicas. Há falta de evidência de carcinogenicidade através da inalação de metal níquel presente em poeiras.
Selênio	A principal via de exposição humana não ocupacional é através dos alimentos. Os sinais de toxicidade mais marcantes documentados são a queda de cabelos e problemas nas unhas. Enfraquecimento de dentes também tem sido associado ao excesso de selênio na dieta. Exposição industrial frequentemente resulta em respostas alérgicas e/ou de irritação, primeiramente nas mucosas e olhos. Efeitos crônicos são raros. Não há dados conclusivos sobre a sua carcinogenicidade ao homem.
Vanádio	A principal via de exposição é a ingestão de alimentos. Em exposição ocupacional a principal via é a inalação. Uma vez absorvido ele é concentrado no pulmão e em menor quantidade no intestino e pele. O sistema respiratório pode ser afetado, causando irritações no trato respiratório, tosses, rinites e bronquites crônicas. Há poucos relatos sobre os efeitos do vanádio sobre a pele, embora equizemas podem desenvolver. Há trabalhos relacionando a exposição a poeiras contendo vanádio, com irritações das mucosas, olhos, nariz e garganta. Não há indicação de carcinogenicidade ou mutagenicidade.
Zinco	A principal via de exposição humana é a ingestão. A inalação é uma fonte insignificante para exposição não ocupacional. Ingestão superior à 72g de Zn produz sintomas de febre, diarreia, vômitos e outras irritações gastrointestinais. Em exposição ocupacional os trabalhadores podem mostrar distúrbios gastrointestinais e disfunções do fígado. O zinco não é considerado carcinogênico.