

**LUIZ CARLOS DA SILVA**

**NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO ADICIONADOS A UM  
BIOSSÓLIDO TRATADO PELO PROCESSO N-VIRO  
APLICADO EM SOLOS ÁCIDOS DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre, Programa de pós-graduação em Ciência do Solo, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Luiz Antonio Corrêa Lucchesi, *PhD*.

Co-orientador: Prof. Henrique Soares Koehler, Dr.

**CURITIBA**

**2007**



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	25
1.1 OBJETIVO GERAL.....	26
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	26
1.3 JUSTIFICATIVA.....	27
1.4 HIPÓTESE .....	28
<b>2 REVISÃO BIBIOGRÁFICA</b> .....	29
2.1 LODOS DE ESGOTO.....	29
2.1.1 Características químicas gerais de lodos de esgoto tratados pelo Processo N-Viro.....	30
2.1.2 Processo N-Viro na Estação de Tratamento de Esgotos Belém em Curitiba .....	31
2.2 CICLO GLOBAL DO FÓSFORO .....	32
2.3 FÓSFORO NA AGRICULTURA .....	33
2.3.1 Fósforo como nutriente de plantas .....	34
2.3.1.1 Teores e acumulação de fósforo no tecido de plantas cultivadas.....	34
2.3.2 Fósforo no solo .....	36
2.3.2.1 Disponibilidade no solo e absorção de fósforo pelas plantas .....	36
2.3.2.2 Formas de fósforo no solo .....	37
2.4 FATORES DE INTERFERÊNCIA NA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO .....	41
2.4.1 Reações de adsorção de fósforo no solo .....	41
2.4.1.1 Adsorção de fósforo por oxidróxidos de ferro e alumínio do solo .....	41
2.4.1.2 Adsorção de fósforo por aluminossilicatos do solo .....	42
2.4.1.3 Adsorção de fósforo por precipitação com ferro, alumínio e cálcio da solução no solo .....	42
2.4.2 Fatores de interferência na adsorção de fósforo no solo.....	43
2.4.2.1 pH e adsorção de fósforo .....	43
2.4.2.2 Envolvimento da matéria orgânica na adsorção de fósforo no solo.....	44
2.4.2.2.1 Adição de resíduos orgânicos aos solos .....	44
2.5 FONTES DE FÓSFORO .....	46

2.5.1 Superfosfato triplo.....	47
2.5.2 Superfosfato simples .....	48
2.5.3 Fatores de influência na eficiência agronômica de fontes solúveis de fósforo .....	48
2.5.3.1 pH do solo .....	49
2.5.3.2 Capacidade de adsorção e precipitação de fósforo do solo .....	49
2.5.3.3 O conteúdo de matéria orgânica do solo .....	50
2.5.3.4 Granulometria do fertilizante.....	50
2.5.3.5 Outros fatores.....	51
2.5.4 Fosfatos naturais parcialmente acidulados.....	51
2.5.4.1 Fatores de influência sobre a eficiência de fosfatos naturais parcialmente acidulados .....	52
2.5.5 Fosfatos naturais .....	52
2.5.5.1 Parte não-acidulada de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada... 53	
2.5.5.2 Condições favoráveis à solubilização de fosfatos naturais.....	53
2.5.5.3 Acidez.....	54
2.6 ALTERAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SOLOS ÁCIDOS TRATADOS COM LODOS DE ESGOTO.....	55
2.6.1 Alterações de características químicas de solos ácidos adubados com fertilizantes fosfatados.....	65
2.7 EFEITOS DE VARIÁVEIS QUÍMICAS DE SOLOS SOBRE A CULTURA DE FEIJOEIRO .....	66
2.8 EFEITOS DA APLICAÇÃO DE LODOS DE ESGOTO SOBRE OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS.....	67
2.9 EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODOS DE ESGOTO E MATERIAIS ORGÂNICOS APLICADOS ISOLADAMENTE OU EM MISTURA COM FONTES DE FÓSFORO .....	69
2.10 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FONTES DE FÓSFORO .....	73
2.10.1 Índice de eficiência agronômica.....	74
2.11 EXTRATORES DE FÓSFORO.....	75
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>78</b>

3.1 LOCALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS .....	78
3.2 SOLOS .....	78
3.3 LODO DE ESGOTO TRATADO PELO PROCESSO N-Viro .....	79
3.4 FONTES UTILIZADAS PARA ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO .....	81
3.5 ADIÇÃO DE FÓSFORO A LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO.....	82
3.6 PREPARO DE TRATAMENTOS .....	86
3.7 RANDOMIZAÇÃO DE UNIDADES EXPERIMENTAIS E ADIÇÃO DE TRATAMENTOS AO SOLO.....	86
3.8 SEMEADURA.....	87
3.9 CONDUÇÃO DE EXPERIMENTOS .....	87
3.9.1 Adubação nitrogenada e potássica.....	87
3.9.2 Coleta de dados durante o ciclo da cultura.....	87
3.9.3 Colheita .....	88
3.9.4 Coleta de dados pós-colheita .....	89
3.9.4.1 Altura de plantas e componentes de produção do feijoeiro .....	89
3.9.4.2 Análises químicas de solo e tecido vegetal .....	89
3.10 ESTATÍSTICA E AJUSTE DE CURVAS DE TENDÊNCIA .....	90
3.11 ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA .....	90
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>92</b>
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE EXPERIMENTO COM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVdt) DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI-PR.....	92
4.1.1 Dados Químicos de LVdt e fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro .....	92
4.1.1.1 Índice de pH CaCl <sub>2</sub> de LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	92
4.1.1.2 Alumínio trocável em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	95
4.1.1.3 Acidez potencial em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	99
4.1.1.4 Cálcio trocável em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de Fósforo.....	102

4.1.1.5 Magnésio trocável em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	105
4.1.1.6 Carbono orgânico em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de Fósforo .....	106
4.1.1.7 Fósforo extraível Mehlich-1 em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	108
4.1.1.8 Fósforo extraível Mehlich-1 e resina trocadora de íons em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis de fósforo de um fosfato natural parcialmente acidulado.....	112
4.1.1.9 Percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	114
4.1.2 Altura de plantas e componentes de produção do feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico (LVdt) fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	117
4.1.2.1 Altura de plantas de feijoeiro cultivado em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo ....	118
4.1.2.2 Produção de grãos de feijoeiro cultivado em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	119
4.1.2.3 Produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em LVdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	124
4.1.2.4 Índices de eficiência agrônômica.....	129
4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE EXPERIMENTO COM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO (LVAdt) DO MUNICÍPIO DE CONTENDA-PR.....	131
4.2.1 Dados químicos de LVAdt e fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro.....	131
4.2.1.1 Índice de pH $\text{CaCl}_2$ de LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis de fósforo de diferentes fontes.....	132

4.2.1.2 Alumínio trocável em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	134
4.2.1.3 Acidez potencial em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	138
4.2.1.4 Cálcio trocável em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	142
4.2.1.5 Magnésio trocável em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	146
4.2.1.6 Carbono orgânico em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	148
4.2.1.7 Fósforo extraível Mehlich-1 em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado com diferentes níveis e fontes de fósforo .....	149
4.2.1.8 Fósforo extraível Mehlich-1 e Resina trocadora de íons em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo oriundo de um fosfato natural parcialmente acidulado.....	156
4.2.1.9 Percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	161
4.2.2 Altura de plantas e componentes de produção de feijoeiro cultivado LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	166
4.2.2.1 Altura de plantas de feijoeiro cultivado em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo ....	166
4.2.2.2 Produção de grãos de feijoeiro cultivado em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.....	168
4.2.2.3 Produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em LVA <sub>dt</sub> fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo .....	174
4.2.2.4 Índices de eficiência agrônômica.....	178
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>181</b>

5.1 RECOMENDAÇÕES .....	183
5.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	184
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>185</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>212</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVdt) DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI - PR E LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO (LVAdt) DO MUNICÍPIO DE CONTENDA-PR.....	79
TABELA 2 - GRANULOMETRIA E CAPACIDADE DE CAMPO DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVdt) DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI-PR E LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVAdt) DO MUNICÍPIO DE CONTENDA-PR.....	80
TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ORIUNDO DA ETE-BELÉM - N-Viro Soil .....	80
TABELA 4 - TEORES DE FÓSFORO E FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST).....	81
TABELA 5 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO, QUANTIDADE DA FONTE DE FÓSFORO E QUANTIDADE PURA DE LODO E TOTAL DE MISTURAS DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO COM FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO, EM PERCENTAGEM.....	82
TABELA 6 - DOSES TOTAIS, POR HECTARE, DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO, QUANTIDADES DE FONTES FÓSFORO E DOSE PURA DE LODO NAS MISTURAS PARA ESTABELECIMENTO DE TRATAMENTOS .....	84
TABELA 7 - DOSES TOTAIS, POR VASO, DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO, QUANTIDADE DE FONTES FÓSFORO E DOSE PURA DE LODO NAS MISTURAS PARA ESTABELECIMENTO DE TRATAMENTOS .....	85
TABELA 8 - RECOMENDAÇÃO DE NITROGÊNIO (N) E POTÁSSIO (K) POR HECTARE <sup>1</sup> , BASEADA NA CQFS-NRS-SBCS, (2004) E CALCULADAS PARA VASOS SUPRIDAS NA FORMA DE NITRATO DE POTÁSSIO .....	88
TABELA 9 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO A PARTIR DE DADOS DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO.....	129
TABELA 10 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE DIFERENTES FONTES A PARTIR DE DADOS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO.....	178

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - EQUILÍBRIOS E INTERDEPENDÊNCIAS DE FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO .....	38
FIGURA 2 - MODELO CONCEITUAL DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE REDUÇÃO NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS AO SOLO .....	45
FIGURA 3 - <b>(A.1)</b> pH CaCl <sub>2</sub> DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO E FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE pH CaCl <sub>2</sub> FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO; <b>(A.3)</b> pH CaCl <sub>2</sub> EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO.....	94
FIGURA 4 - <b>(A.1)</b> ALUMÍNIO TROCÁVEL DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; <b>(A.3)</b> ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO .....	96
FIGURA 5 - CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH CaCl <sub>2</sub> DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO .....	97
FIGURA 6 - <b>(A.1)</b> ACIDEZ POTENCIAL DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; <b>(A.3)</b> ACIDEZ POTENCIAL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO FÓSFORO...	100
FIGURA 7 - <b>(A.1)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE pH CaCl <sub>2</sub> ; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE ALUMÍNIO TROCÁVEL .....	101

FIGURA 8 - (A.1) CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST.....	104
FIGURA 9 - (A.1) MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST.....	107
FIGURA 10 - CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE UM FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST) .....	108
FIGURA 11 - (A.1) FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO ADICIONADOS A LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST.....	110

FIGURA 12 - <b>(A.1)</b> FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ALVORADA; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS ADIÇÃO DE FÓSFORO.....	113
FIGURA 13 - <b>(A.1)</b> PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; <b>(A.3)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 .....	115
FIGURA 14 - ALTURA DE PLANTAS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFÓRO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST).....	119
FIGURA 15 - <b>(A.1)</b> PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; <b>(A.3)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; <b>(A.4)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST.....	121

FIGURA 16 - <b>(A.1)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; <b>(A.3)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE ST .....	123
FIGURA 17 - <b>(A.1)</b> PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; <b>(A.3)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; <b>(A.4)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST .....	126
FIGURA 18 - <b>(A.1)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA ; ; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 A PARTIR DE SS <b>(A.3)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 A PARTIR DE ST .....	127

FIGURA 19 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA ; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE ST ..... 128

FIGURA 20 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA EM FUNÇÃO DA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO PRODUZIDA POR NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE SUPERFOSFATO SIMPLES EM FUNÇÃO DA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO PRODUZIDA POR NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO ..... 130

- FIGURA 21 - **(A.1)** pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE UM FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST ..... 133
- FIGURA 22 - **(A.1)** ALUMÍNIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.3)** ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE FONTE DE ADIÇÃO DE FÓSFORO ..... 136
- FIGURA 23 - CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO ..... 137
- FIGURA 24 - **(A.1)** ACIDEZ POTENCIAL DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) e SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.3)** ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE FONTE DE ADIÇÃO DE FÓSFORO ..... 139
- FIGURA 25 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$ ; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE ALUMÍNIO TROCÁVEL ..... 140

- FIGURA 26 - **(A.1)** CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST ..... 143
- FIGURA 27 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (SS); **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO (ST) ..... 144
- FIGURA 28 - **(A.1)** MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST ..... 147

- FIGURA 29 - CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)..... 149
- FIGURA 30 - **(A.1)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST..... 151
- FIGURA 31 - **(A.1)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL RESINA TROCADORA DE ÍONS EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE UM FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA ..... 158
- FIGURA 32 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA PARA PRODUÇÃO GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL RESINA TROCADORA DE ÍONS ..... 161

- FIGURA 33 - **(A.1)** PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO ..... 163
- FIGURA 34 - ALTURA DE PLANTAS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFÓRO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST) ..... 167
- FIGURA 35 - **(A.1)** PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO COM FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST ..... 170
- FIGURA 36 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (SS); **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO (ST) ..... 171

FIGURA 37 - <b>(A.1)</b> PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; <b>(A.3)</b> PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; <b>(A.4)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 .....	175
FIGURA 38 - CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO ACUMULADO .....	176
FIGURA 39 - <b>(A.1)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (IEA - SS) EM FUNÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO PRODUZIDA A PARTIR DESTA FONTE; <b>(A.2)</b> CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE SUPERFOSFATO SIMPLES EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL A PARTIR DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE SUPERFOSFATO TRIPLO .....	179

Ao Deus de Abraão, de Isaac e Jacó-Israel, Jeová, o Criador, incondicionalmente: pela vida e pela paz, que excede a todo o entendimento;

Aos meus pais Eurides e Leandrina: pelo amor com que me geraram e criaram;

À todos os verdadeiros amantes do ambiente natural conservado;

Aos nobres colegas de tão belo ofício: a Engenharia Agrônômica;

À Vincent Van Gogh: pela arte manifesta em sua breve perscruta do mundo dos vivos;

À mulher amada;

Aos músicos e à música de todos os tempos, especialmente ao rock inglês, dedico esta singela contribuição.

## AGRADECIMENTOS

Meus especiais agradecimentos seguem:

À universidade Federal do Paraná e aos que lutam para engrandecê-la;

Ao Professor orientador Eng. Agrônomo Dr. Luiz Antonio Corrêa Lucchesi, pela experiência e visão agrônomo-ambiental compartilhadas durante as disciplinas por ele ministradas;

Ao Professor Co-orientador Eng. Florestal Dr. Henrique Soares Koehler, do Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo desta instituição: pela imprescindível orientação estatística;

Ao Químico Ambiental Jean Carlos Padilha: pela colaboração durante a pesquisa;

Ao Eng. Agrônomo Dr. Jetro Turan Salvador: pela atenção dispendida em momentos importantes relacionados com a pesquisa;

A todos os professores do corpo docente deste Programa de Pós-Graduação: pela dedicação de seu tempo, não somente aos seus orientados, mas também ao corpo discente como um todo e, em especial, ao Eng. Agrônomo Dra. Beatriz Monte Serrat e ao Eng. Florestal Dr. Carlos Bruno Reissmann;

Ao IAPAR - Instituto Agrônomo do Paraná, nas pessoas do Eng. Agrônomo Ms Marco Antonio Lollato e Eng. Agrônomo Ms José Nivaldo Póla: pelo pronto atendimento quando da solicitação das sementes utilizadas nesta pesquisa;

Ao funcionário do Laboratório de Química e Fertilidade do Solo Flori Roberto B. Margraf, à Elda, do Laboratório de Física do Solo, à bibliotecária Simone Amadeo e demais funcionários da biblioteca do Setor de Ciências Agrárias: pelo sempre pronto atendimento;

Aos amigos Nair e Manoel, do restaurante universitário, e Manoel "Baiano": pela convivência pacífica, pela destreza em servir e singeleza do ser;

E, por fim, ao nosso povo brasileiro: pelo custeio de curso e minha subsistência por intermédio da CAPES.

Terás... de abrir um buraco... e cobrirás com terra os teus excrementos.  
(Deuteronômio, 23: 13).

## RESUMO

Dentre os maiores problemas ambientais da atualidade estão a geração e a destinação final de lodos de esgoto. A reciclagem agrícola desses bio-sólidos constitui-se em alternativa agrônomo-ambiental viável desde que suas características químicas, físicas e biológicas condicionadoras de solos sejam adequadas. No Paraná, esses resíduos ainda são pouco reciclados em solos. Parcela do lodo de esgoto gerado em Curitiba no ano de 2001 foi tratada pelo Processo N-Viro, gerando um lodo de esgoto alcalinizado denominado N-Viro Soil, adequado a este modelo de destinação final. Desde então, tal produto tem sido objeto de pesquisas relacionadas ao seu uso potencial como corretivo de acidez e como fertilizante de solos. Para o fósforo, baixas doses deste produto não suprem a exigência nutricional das culturas. Para supri-la integralmente a partir desta fonte, grandes quantidades de lodo deveriam ser incorporadas ao solo. Um atrativo e estímulo adicional ao uso de quantidades adequadas deste bio-sólido pelos produtores agrícolas seria seu enriquecimento com P oriundo de fontes alternativas e/ou tradicionais. Este trabalho objetivou avaliar a eficiência agrônômica de lodo de esgoto tratado pelo Processo N-Viro adicionado de 0,436% (1%  $P_2O_5$ ), 0,872% (2%  $P_2O_5$ ) e 1,745% (4%  $P_2O_5$ ) de P oriundos de um fosfato natural parcialmente acidulado e de superfosfato simples, tendo-se como fonte de referência este mesmo lodo adicionado pelos mesmos níveis de P de superfosfato triplo para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado num Latossolo Vermelho distrófico ácido e num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ácido do Paraná. O lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P alterou o pH do solo (em  $CaCl_2$  0,01 mol  $L^{-1}$ ), e os teores trocáveis de Ca, Mg e Al e P extraível Mehlich-1 (HCl 0,05 M +  $H_2SO_4$  0,0125 M) em ambos os solos, e aumentou a disponibilidade no solo e acumulação de P nas plantas assim como a produtividade de grãos e de massa seca total da parte aérea de feijoeiro. Tanto o fosfato natural parcialmente acidulado quanto o superfosfato simples geraram melhores resultados que o superfosfato triplo. Os melhores níveis de adição de P foram 0,436% e 0,872% P para o Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR e 0,436% P para o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Contenda-PR.

**Palavras-chave:** Latossolo; enriquecimento com fósforo; fontes de fósforo; lodo de esgoto; N-Viro Soil; eficiência agrônômica.

## ABSTRACT

Among the largest current environmental problems is the production and final destination of sewage sludges. The agricultural recycling is a viable agronomic and environmentally sound alternative if their chemical, physical and biological conditioners characteristics are adequate. In Parana State, Brazil, these residues are not yet widely recycled in soils. Part of the sewage sludge produced in the City of Curitiba during the year of 2001 was treated by the N-Viro Process wich generated an alkaline stabilized sewage sludge called N-Viro Soil, adequate for that purpose. The use of that product as a potential soil lime and fertilizer has been researched. Concerning phosphorus, low dosis of N-Viro Soil supply just part of the nutritional requirements of crops. Therefore, to supply it fully one must add larger quantities of such biosolid to the soil. To encourage the adequate use of this biosolid by farmers one proposes its enrichment with alternatives and, or traditional phosphorus sources. This research aimed to evaluate the agronomic effectiveness of one sewage sludge treated by the N-Viro Soil Process added with 0,436% (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 0,872% (2% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 1,745% (4% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) of phosphorus derived from a partially acidulated phosphate rock and a single superphosphate compared to a triple superphosphate under the same conditions for bean plant (*Phaseolus vulgaris* L.) growed in two acidic oxisols from Parana. The soil pH (in CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>), the exchangeable Ca, Mg and Al, and the extractable phosphorus Mehlich-1 (HCl 0,05 M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125 M) were modified by the treatments. The phosphorus availability and accumulation by the plants, the grain and total dry matter production by common bean were increased. Both the partially acidulated phosphate rock and the single superphosphate generated better results than the triple superphosphate treatments. The best phosphorus levels were 0,436% e 0,872% P for the oxisol from Arapoti-PR and 0,436% P for the oxisol from Contenda-PR.

**Key words:** Oxisols; phosphorus enrichment; sources of phosphorus; sewage sludge; N-Viro Soil; agronomic effectiveness.

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os maiores problemas de ordem ambiental na atualidade encontra-se a destinação final de lodos de esgoto gerados no ambiente urbano. A aplicação em solos agrícolas destaca-se como um método sustentável de valorização e uso destes biossólidos de esgoto (lodos de esgoto) em países desenvolvidos. Em Curitiba, não diferente dos demais grandes centros urbanos, passivos ambientais são verificados em função de acúmulo de lodo, ainda pouco reciclado em solos.

Para incorporação nos solos agrícolas o lodo de esgoto deve passar por tratamento e estar em conformidade com legislação pertinente. Dentre os métodos de tratamento de lodos, crus ou digeridos, destaque-se o “*Processo de Estabilização Alcalina Avançada com Subsequente Secagem Acelerada*” (Processo N-Viro) cujo produto final é um lodo de esgoto alcalinizado denominado N-Viro Soil. De maneira geral, o produto possui elevado conteúdo de matéria orgânica e reação alcalina, além de possuir teores de alguns micro e macronutrientes dentro de faixas agrônomo-ambientais.

Parcela do lodo de esgoto de Curitiba foi tratada por aquele processo em 2001, gerando cerca de 20000 mil toneladas de lodo tratado. Desde então, parte deste material tem sido objeto de pesquisas relacionadas ao seu potencial corretivo fertilizante de solos num raio de cerca de 270 km da capital paranaense, viabilizando sua retirada de parte do lodo gerado na bacia hidrográfica do Altíssimo Rio Iguaçu, em Curitiba.

Os lodos de esgoto alcalinizados possuem elevado poder de neutralização e nutrientes como cálcio, magnésio, zinco e outros, condicionando o ambiente do solo e melhorando o ambiente para o desenvolvimento de plantas. Especificamente para o fósforo, pequenas quantidades suprem parte das exigências nutricionais das plantas. Para supri-lo integralmente dever-se-ia incorporar grandes quantidades de lodo ao solo, elevando-se excessivamente seu pH, e gerando ambiente prejudicial ao desenvolvimento da maioria das culturas.

Assim sendo, a adição de fósforo (P) a lodo de esgoto alcalinizado com fontes alternativas e tradicionais pode ser um atrativo e estímulo adicional ao uso de quantidades adequadas deste biossólido.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetivou avaliar a eficiência agronômica de um lodo de esgoto alcalinizado adicionado de 0,436% P (1%  $P_2O_5$ ), 0,872% P (2%  $P_2O_5$ ) e 1,745% P (4%  $P_2O_5$ ) provenientes de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada (FPA), superfosfato simples (SS) e superfosfato triplo (ST) para o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado num Latossolo Vermelho distrófico ácido e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ácido do Estado do Paraná.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente objetivou-se:

- a) Analisar, ao final de experimentos, as variáveis químicas de solo: pH  $CaCl_2$  (Cloreto de cálcio  $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ), acidez potencial (H+Al), cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ) e alumínio ( $Al^{3+}$ ) trocáveis, carbono orgânico oxidável e fósforo (P) Mehlich-1 para todos os tratamentos;
- b) Efetuar estudo comparativo de fósforo extraível pelos extratores de Mehlich-1 e resina trocadora de íons a partir de tratamentos referentes aos níveis de adição 0% P (testemunhas específicas), 0,436% P, 0,872% P e 1,745% P a partir do fosfato natural parcialmente acidulado alvorada;
- c) Analisar o fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro;
- d) Avaliar o crescimento em altura do feijoeiro;
- e) Avaliar a produção de grãos de feijoeiro;
- f) Avaliar a produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro (folhas + pedicelos + ramos + cascas + grãos);
- g) Gerar índices de eficiência agronômica a partir da produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro obtida a partir de níveis de adição de fósforo (0,436% P, 0,872% P e 1,745% P) a lodo de esgoto alcalinizado a partir da melhor ou melhores fontes testadas, FPA e/ou SS, em relação aos mesmos níveis de adição de P a partir do ST, tomando-o como fonte de referência;

- h) Indicar o melhor, ou melhores, níveis de adição de fósforo a lodo de esgoto alcalinizado;
- i) Indicar a melhor, ou melhores, fontes de adição de fósforo a lodo de esgoto alcalinizado;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O lodo de esgoto produzido em Curitiba e Região Metropolitana, se tratado pelo Processo N-Viro, possui qualidade para a reciclagem no solo agrícola. Este fato viabiliza sua retirada da bacia hidrográfica do Rio Iguaçu.

O lodo de esgoto alcalinizado, por meio de seus constituintes minerais, matéria orgânica e subprodutos de sua decomposição, é capaz de condicionar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Amparado por legislação específica, pode ser utilizado como corretivo da acidez do solo, precipitando o alumínio trocável e diminuindo sua toxidez às plantas.

Parte do fósforo requerido pelas plantas pode ser suprida pelo lodo de esgoto que, ao ser adicionado com fósforo, pode servir como fonte melhorada deste nutriente. Pode-se, assim, diminuir as quantidades de lodo incorporado aos solos, reduzir custos com corretivos de acidez de solo e adequar-se os níveis totais e disponíveis de fósforo nos solos do Paraná, naturalmente pobres deste nutriente. Considerados em conjunto, estes fatores proporcionam melhores condições de solo, favorecendo o desenvolvimento de plantas cultivadas.

Por falta de estímulos e atrativos maiores, o lodo de esgoto alcalinizado ainda é pouco reciclado nos solos agrícolas. Considerando-se como fatores decisivos na escolha de uma fonte de fósforo o fornecimento de outros nutrientes e seu potencial corretivo de acidez de solo (GOEDERT, 1986) a adição de fósforo a esta classe de biossólido surge como procedimento sustentável no uso de fertilizantes fosfatados e de lodos de esgoto, atraindo os produtores para a presente modalidade de destinação final. Pode-se, dessa forma, incrementar a produtividade por unidade de área cultivada, diminuindo custos com operações de adubação e correção de solos, reduzindo-se o custo total de produtores de feijão que, na sua maioria, são de caráter familiar e descapitalizados no Estado do Paraná.

#### 1.4 HIPÓTESE

Lodos de esgoto tratados pelo Processo N-Viro (biossólidos alcalinizados) condicionam quimicamente o solo em função de sua reação alcalina e, ao serem adicionados de fósforo proveniente do fosfato natural parcialmente acidulado alvorada, superfosfato simples e superfosfato triplo, não proporcionam condições que favorecem a indisponibilização de fósforo destas fontes, e sua eficiência é mantida para o crescimento e produção de feijoeiro em Latossolos ácidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 LODOS DE ESGOTO

De acordo com definição de ANDRADE (1999) lodos de esgoto são “resíduos semi-sólidos, predominantemente orgânicos, com teores variáveis de componentes inorgânicos, provenientes do tratamento de águas residuárias domiciliares ou industriais”. A literatura trata os lodos de esgoto como um dos maiores problemas da atualidade, constituindo-se resíduos perigosos à saúde humana e animal, gerador de passivos ambientais nos centros urbanos (ANDREOLLI, 1999).

Diversas estratégias de destinação final de lodos de esgoto têm sido executadas. Dentre elas: a incineração, transformação em agregado leve ou tijolos para construção civil e despejo nos oceanos e em aterros sanitários privados ou municipais (TSUTIYA, 2001). As duas últimas modalidades de destinação final estão proibidas em países desenvolvidos (ANDREOLLI, 1999). A reciclagem agrícola, assim, emerge como prática sustentável do ponto de vista econômico e biogeoquímico, devolvendo ao campo os nutrientes exportados pelas culturas. Porém, para incorporação em solos agrícolas lodos de esgoto devem possuir qualidade adequada (LUCCHESI et al., 2004).

Segundo BRANCO (1978) e DROSTE (1997) o tratamento de lodos de esgoto é um processo predominantemente de oxidação e de transformação de seus componentes em substâncias simples como sais minerais e dióxido de carbono. Dentre as formas de tratamento de lodos de esgoto, crus ou digeridos, aeróbia e anaerobicamente, destaque-se o Processo N-Viro ou, “*Processo de Estabilização Alcalina Avançada com Subseqüente Secagem Acelerada*” - desenvolvido por Jeffrey Burnham e pela N-Viro Energy Systems (BURNHAM e HATFIELD, 1992). Constitui-se num “*processo adicional de redução de patógenos*” em lodos de esgoto (USEPA, 1979). Um pré-requisito básico a ser satisfeito para a utilização deste processo é o teor de sólidos acima de 12 % para lodos não tratados (N-Viro, 2002).

Segundo LOGAN e HARRISON (1995) o processo N-Viro combina desaguamento do lodo e adição de um ou mais subprodutos industriais alcalinos, que por meio de combinação de alto pH, calor e secagem, reduz-se as quantidades

de patógenos e parasitos presentes a próximo de zero. Os reagentes são adicionados à torta de lodo mantendo-se a temperatura entre 52 e 62 °C. Tendo a massa de lodo alcançado novamente a temperatura ambiente, esta deve ser mantida sob condições controladas por, no mínimo, 7 dias.

LUCCHESI et al., (2004) salienta o ambiente de estresse gerado no biossólido quando tratado pelo Processo N-Viro: “alcalinização, elevação da temperatura, liberação de amônia e secagem acelerada”. Não o esteriliza, mas sim, o “pasteuriza”, o que permite a manutenção de uma “microbiota heterotrófica benéfica”, semelhante à existente nos solos. Essa microbiota do lodo já tratado, por sua vez, “tampona o produto contra uma re-inoculação por organismos patogênicos”. A partir deste processo, obtêm-se um lodo de esgoto alcalinizado (LA) de Classe A em relação ao nível de desinfecção (USEPA, 1992).

De acordo com N-Viro (2004) os odores indesejáveis característicos de lodos alcalinizados são eliminados “devido à pasteurização e à manutenção da microorganismos benéficos, à degradação de compostos orgânicos responsáveis pelos odores, à grande superfície específica dos reagentes utilizados e à rapidez de condução do processo”. Quanto à presença de metais pesados é tido como “lodo de excepcional qualidade”.

#### 2.1.1 Características químicas gerais de lodos de esgoto tratados pelo Processo N-Viro

Os teores totais de “elementos traço” de 28 N-Viro Soil produzidos nos Estados Unidos, Reino Unido e Austrália foram caracterizados por LOGAN e HARRISON (1995). Variações médias para os teores totais, em mg kg<sup>-1</sup>, foram obtidas para a massa seca do material analisado em comparação ao teor exigido pelo USEPA: As de 2,43 a 35,8 (padrão USEPA-EQS<sup>1</sup> se < 41); Cd de 0,0 a 4,02 (USEPA-EQS se < 39); Cu de 42,7 a 294,0 (USEPA-EQS se < 1500); Mo de 0,02 a 3,45 (USEPA se < 75); Ni de 6,58 a 563,0 (USEPA-EQS se < 420); Pb de 0,0 - 452,0 (USEPA se < 840, ou USEPA-EQS se < 300); Se, de 0,58 - 3,67 (USEPA-EQS se < 36); e Zn de 39,3 a 426,0 (USEPA-EQS se < 2800).

---

<sup>1</sup> EQS: Exceptional Quality Sludge, segundo USEPA (1993).

Outras propriedades químicas foram avaliadas por LOGAN e HARRISON (1995) dentre elas: o equivalente carbonato de cálcio (ECC) variou de 18 a 75 %; o pH, de 7,7 a 12,8; a condutividade elétrica (CE), média de 0,8 microsiemens  $\text{cm}^{-1}$ ; N total: 2,2 a 19,3  $\text{g kg}^{-1}$ ; P total 2,46 a 11,4  $\text{g kg}^{-1}$ ; K total 0,92 a 43,1  $\text{g kg}^{-1}$ ; Ca total 105 a 398  $\text{g kg}^{-1}$ ; Mg total 19,6 a 94,5  $\text{g kg}^{-1}$ ; Na total de 5,72 a 59,3  $\text{g kg}^{-1}$ ; e C total de 55,7 a 205,8  $\text{g kg}^{-1}$ . Tais propriedades ratificam a possibilidade do N-Viro Soil ser utilizado tanto como corretivo da acidez do solo quanto fertilizante de baixa concentração em N, P e K. Também pode ser utilizado como condicionador de solo ou como componentes de substratos vegetais diversos.

### 2.1.2 Processo N-Viro na Estação de Tratamento de Esgotos Belém em Curitiba

Após implementação de um plano de gerenciamento na ETE-Belém em Curitiba, foi aprovado e expedido pelo Instituto Ambiental do Paraná, o licenciamento de operações para desaguamento, higienização e reciclagem de lodos de esgoto aeróbios e anaeróbios de 5 estações de tratamento da cidade de Curitiba – PR. Os objetivos delineados resumiram-se na conversão em lodo de esgoto alcalinizado (N-viro Soil), de aproximadamente 20000 toneladas de lodo disponibilizadas (LUCCHESI et al., 2004).

Obtido o produto final, constatou-se por meio de análises necessárias, que estes atendiam os padrões estabelecidos pela proposta de legislação no Paraná e à CFR 40 Parte 503 do USEPA (United States Environmental Protection Agency). Desde então, o produto tem sido reciclado em solos agrícolas sob sistema de plantio direto. O produto, de fácil manipulação, é transportado até a Região dos Campos Gerais, no Estado do Paraná, aonde é reciclado. Têm-se observado estímulo à procura pelo produto. Recomendações de aplicação têm sido embasadas em pesquisas projetadas no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná, e executados em nível de campo (LUCCHESI et al., 2004).

## 2.2 CICLO GLOBAL DO FÓSFORO

Segundo EPSTEIN e BLOOM (2006) na porção biologicamente ativa da biosfera o fósforo (P) ocorre na forma de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). A maior parte do P encontra-se nas rochas, formando complexos com óxidos de cálcio, ferro, magnésio e alumínio. Desses materiais o P é liberado lentamente na forma de fosfato pelos processos de intemperismo. Plantas e microorganismos associados produzem ácidos orgânicos que aceleram sua liberação.

Plantas e microorganismos tendo absorvido fosfato da solução no solo incorporam-no a compostos orgânicos como fosfolipídeos e nucleotídeos, ocorrendo reciclagem desse fosfato orgânico entre os organismos. Porém, pouco dele é convertido em fósforo inorgânico durante a decomposição e é incorporado no solo na forma de compostos de baixa solubilidade ou lixiviado para mares e oceanos e ali permanece por poucos dias até ser depositado em águas profundas por milênios. Eventualmente por forças geológicas tornar-se-á rocha novamente (EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Dados da FAO mostram que produtores australianos, como exemplo de um extremo de exaustão de fosfatos do solo agrícola, aplicam cerca de 1 milhão de toneladas cúbicas de adubos fosfatados por ano em solos cujos teores totais não ultrapassam  $0,00004 \text{ g kg}^{-1}$  da massa total do solo. Solos de outras partes do mundo apresentam normalmente teores de  $0,00006 \text{ g kg}^{-1}$  de P total no solo. Segundo esta mesma fonte, excedem-se os 30 milhões de toneladas métricas aplicadas ao solo todo o ano. Das reservas de fosfato mundiais, as de melhor qualidade encontram-se mais da metade no Marrocos e cerca de 40% encontram-se nos Estados Unidos, China e África do Sul. Dada essa distribuição desigual de depósitos de fosfato no mundo, as perdas de fosfato da terra para o mar e a necessidade do fosfato para a produção agrícola, o mercado desse insumo deverá incrementar-se (FAOSTAT, 2007).

## 2.3 FÓSFORO NA AGRICULTURA

O fósforo (P) é um mineral não renovável (CATCHCART, 1980). Seu uso na agricultura atual é bastante problemático. GLASS, BEATON e BOMKE (1980) afirmam que, da disponibilidade limitada do elemento na natureza e sua essencialidade como nutriente de sistemas vivos surge um paradoxo. Para o planejamento da proteção ambiental dos ecossistemas deve-se “manter baixo o pool de P disponível” para as plantas no solo. Isso pode ocorrer devido à fixação em compostos inorgânicos e de incorporação e conseqüente imobilização em compostos orgânicos pela microbiota. Desse modo, dada essa “estratégia”, as perdas de P são pequenas em locais poucos perturbados por ação antrópica (STAUFFER e SULEWSKI, 2004).

Estes mesmos autores salientam que, mesmo em solos cultivados por longos anos as perdas de P por lixiviação são pouco significativas, verificando-se, porém, uma redistribuição nas áreas ou carreamento pela erosão e “runoff”. Este fato, em conformidade com NOVAIS e SMITH (1999), leva à eutroficação de rios, lagos e aos problemas daí advindos como o crescimento exagerado de algas, alteração de pH, aumento de demanda biológica de oxigênio (DBO), turbidez da água, liberação de toxinas, morte de peixes, animais e descontrole geral dos ecossistemas aquáticos e, conseqüentemente, à redução drástica da qualidade da água. Processos estes, facilmente controláveis por tecnologias conservacionistas disponíveis e aplicáveis. Além disso, o excesso de P nos solos pode causar deficiência induzida de outros nutrientes como o zinco (Zn) e o ferro (Fe).

NOVAIS e SMITH (1999) ainda frisam que, ao se fazer uma comparação do uso de fósforo entre países subdesenvolvidos e desenvolvidos, percebe-se um grande contraste. Nos primeiros, predominam as pesquisas em busca de níveis críticos de “P disponível” para boas produtividades enquanto que nos segundos direcionam-se pesquisas com o intuito de se mudar o “nível muito alto” para excessivo ou “nível crítico ambiental” (NCA) para os extratores de “P disponível” em uso. Por isso, ênfase tem sido dada aos riscos potenciais do nível muito alto.

Estes autores ainda relatam sugestões de soluções para tais problemas como a adequada utilização do P, inserindo os fosfatos naturais para a correção de níveis de P ao longo do tempo, juntamente com doses menores de fontes mais solúveis de

fósforo para os solos deficientes deste nutriente. Assim, pode-se diminuir os custos de produção e a pressão sobre novas áreas, obtendo-se aumento de produtividade por unidade de área, mais rápida e maior formação de cobertura vegetal e conseqüente diminuição de processos erosivos. Isso restringiria o volume de resíduos, de água e de nutrientes transportados para os ambientes aquáticos, o assoreamento, etc.

### 2.3.1 Fósforo como nutriente de plantas

No metabolismo vegetal, o P se faz necessário na fotossíntese, transferência e transporte de energia, respiração, funções celulares diversas, transferência de genes e reprodução (STAUFFER e SULEWSKI, 2004). Assim, o P torna-se fundamental ao desenvolvimento de plantas, que o demandam em pequenas quantidades em relação a nutrientes como potássio, cálcio, magnésio, etc. Porém, quantidades estas que, impreterivelmente, devem estar presentes na solução do solo para um desenvolvimento satisfatório, pois,... a partir dos papéis deste elemento na fisiologia de plantas ratifique-se que *“sem o P a planta não completa seu ciclo de vida; não pode ser substituído por nenhum outro elemento”* (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

#### 2.3.1.1 Teores e acumulação de fósforo no tecido de plantas cultivadas

Segundo MARSCHNER (1995) o fósforo encontra-se, geralmente, na faixa de 1 a 5 g kg<sup>-1</sup> no tecido vegetal em fase de crescimento e, concentrações acima de 10 g kg<sup>-1</sup> são qualificadas como fitotóxicas. SILVA et al., (2001) avaliaram as alterações na fertilidade de um Argissolo vermelho-amarelo distrófico, sob cana-de-açúcar, quando adicionado de lodo de esgoto combinado ou não com fertilizantes NPK. Os resultados indicaram que lodos de esgoto aumentam a fertilidade do solo pela diminuição da acidez e, dentre outros efeitos benéficos, o fornecimento de P às plantas. GUEDES et al., (2006) aplicaram doses de 10, 20, 40, 80 e 160 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo alcalinizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ácido e concluíram que

a aplicação desta classe de bio-sólido no solo propicia aumento de teores foliares de P e, como consequência, a acumulação do nutriente em eucalipto. KIKUTI et al., (2007) aplicaram doses de 0, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em Latossolo Vermelho distroférrico típico, de textura argilosa a partir de superfosfato triplo. Obtiveram-se ajustes de dados a um modelo quadrático crescente de doses de N sobre os teores de P nas folhas com pecíolos. Estes mesmos autores observaram que, à medida que aumentaram as doses de N aplicadas, obtiveram aumento nos teores foliares de P e, na comparação dos teores médios de P nas folhas com pecíolos do feijoeiro em função das de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, observaram que os resultados de P foliar estavam dentro das faixas adequadas propostas MARTINEZ et al., (1999); WILCOX E FAGERIA (1976) e MALAVOLTA (1992). No presente experimento, uma dose de 30 kg ha<sup>-1</sup> foi adicionada em cobertura aos 13 dias da semeadura. WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) utilizaram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação para testar a combinação de 0, 25, 50 e 75 kg P ha<sup>-1</sup> com 2 Mg ha<sup>-1</sup> peso seco de resíduo de galinheiro, resíduo de curral, palha de milho e composto. A absorção de P aumentou linearmente com a produção de milho. A combinação A de esterco de galinha com a rocha fosfatada propiciou a maior média de absorção de P pelo milho, seguido do composto, restos culturais de milho e esterco de curral. Estes autores, em estudos de campo, trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxa de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada de Minjingu. O conteúdo de P em tecido de milho em geral aumentou em ambas as localidades, o que ocorreu também, para a combinação de materiais orgânicos em mistura com a rocha fosfatada de Minjingu.

Utilizando <sup>32</sup>P marcado de superfosfato simples, XIONG et al., (1996) verificaram que esta fonte de P adicionada a uma rocha fosfatada pouco reativa aumentaram significativamente a absorção de P por azevém cultivado num solo Typic Hapludults, porém, sem verificação de aumento de utilização do nutriente. CHIEN, MENON e BILLINGHAM (1996) utilizando o mesmo P marcado de superfosfato triplo indicou aumento de absorção de P de uma rocha de reatividade média pelas culturas do milho e feijão caupi, cultivadas também em um solo Typic Hapludult. SIMONETE et al., (2003) aplicaram doses de 0, 16,05, 32,10, 48,15,

64,20 e 80,25 g vaso<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, respectivamente 0, 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha<sup>-1</sup> (base seca) a um Argissolo Vermelho-Amarelo em Casa de vegetação. Os teores de 2,16 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> Mg no controle, um carregador de P, é considerado alto (RAIJ et al., 1996) e aumentaram linearmente com a dose de lodo. Uma complementação com P mineral não proporcionou efeito significativo no P acumulado pelo milho, sugerindo que o P adicionado via lodo de esgoto foi suficiente para atender à exigência das plantas pelo nutriente.

Com o objetivo de estimar a capacidade de um bio sólido fresco, um composto de bio sólido, um bio sólido contendo o equivalente a 30 % de CaO, um bio sólido seco a 250 °C e um bio sólido seco ao ar, em fornecer P ao azevém (*Lolium perenne* L.) CORRÊA (2004) aplicou fertilizantes solúveis (142 mg P kg<sup>-1</sup> de solo) ou esta mesma dose de P em Espodossolo e Latossolo utilizando-se como fontes bio sólidos passados por 5 diferentes tratamentos. Obteve resultados diferentes para ambos os solos. No Espodossolo, 3% a 7% do P oriundo dos bio sólidos foi absorvido pelas plantas. No Latossolo, de 1,2% a 3,7% do P do P do bio sólido foi recuperado. A eficiência dos bio sólidos em suprir P às plantas foi similar ao fertilizante no espodossolo, porém, foi reprimido no latossolo a 65% a 67% da eficiência do fertilizante.

### 2.3.2 Fósforo no solo

#### 2.3.2.1 Disponibilidade no solo e absorção de fósforo pelas plantas

A despeito das pequenas quantidades absorvidas, o P se constitui um macronutriente primário. Ao contrário de sua quase imobilidade no solo, é altamente móvel na planta e circula continuamente de acordo com as características fisiológicas de cada espécie vegetal (RAIJ, 1991).

As formas de P predominantes na solução do solo são as inorgânicas, verificando-se participação mínima de formas orgânicas mais solúveis. Desse modo, a absorção de P pela planta é sensível a este P em solução. Isto é, aumentando-se a concentração de P na solução do solo, maior absorção ocorrerá (NOVAIS e SMITH, 1999).

As plantas absorvem o fósforo de forma ativa, na forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$ , sendo preferencial a primeira delas (MARSCHNER, 1995). Conforme NOVAIS e SMITH (1999) em condições de pH próximo de 4,0 a 5,0 podem ser detectadas concentrações consideráveis da forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . A medida que se reduz a acidez do solo, elevando-se o pH próximo ou acima da neutralidade, aumentam as quantidades de  $\text{HPO}_4^{2-}$  como a mais biodisponível na solução do solo. Em pH acima de 8,0 já se verificam pequenas concentrações de  $\text{PO}_4^{3-}$ , forma dominante em condições de extrema alcalinidade.

Segundo STEVENSON (1986) a forma inorgânica  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  constitui cerca de 95 % do fosfato na solução do solo. Pela mesma razão é a forma mais absorvida pelas plantas que, em função do aumento do pH, tem sua absorção diminuída, podendo cessar a pH 9,0 (MARSCHNER, 1995). Ao contrário disso, o aumento do pH do solo, aumenta a forma absorvida  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Em geral o pH de maior disponibilidade de P no solo situa-se na faixa de 5,5 a 6,8 em água e 5,0 a 6,2, pH  $\text{CaCl}_2$ , (TISDALE et al., 1993), condições na quais se obtém maiores solubilidades, tanto de fosfatos de alumínio, ferro quanto fosfatos de cálcio.

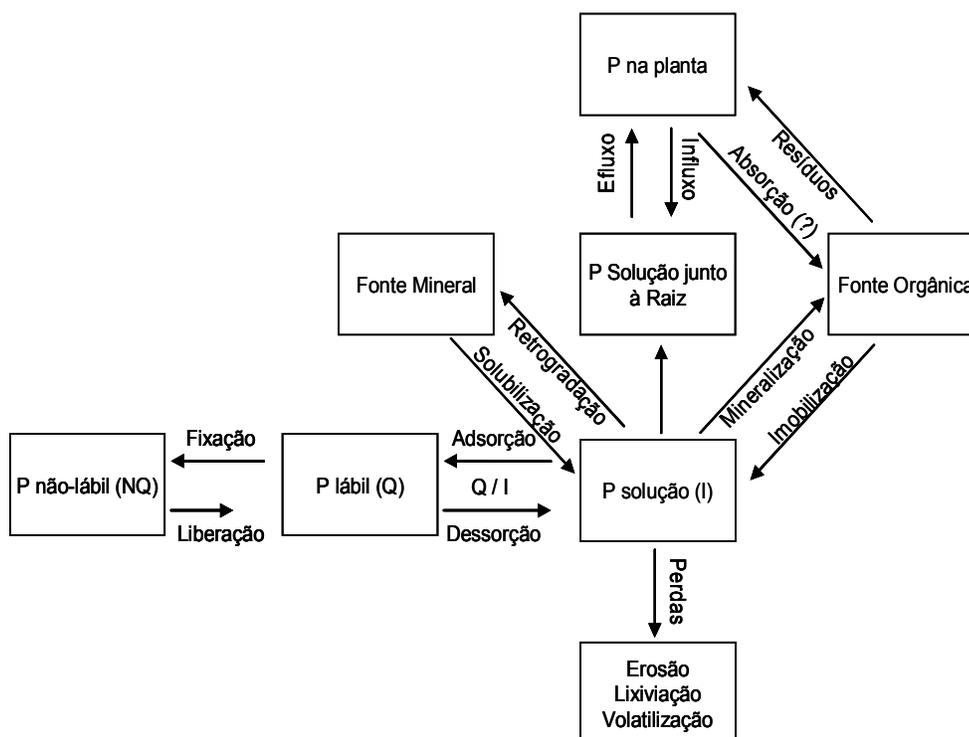
#### 2.3.2.2 Formas de fósforo no solo

De acordo com extensa revisão de NOVAIS e SMITH (1999) o P apresenta-se em várias formas nos diferentes compartimentos do sistema solo-planta. E, dentre essas formas, existem interdependências e equilíbrios como ilustrado na Figura 1.

Considerar-se-á, inicialmente, as fontes minerais (presentes no solo ou adicionadas), tida pelos autores como o “mais provável repositório dos fertilizantes aplicados ao solo e, particularmente para os solos tropicais, naturalmente pobres em P-disponível”. Essas fontes minerais de P, de diferentes origens, podem ser utilizadas em diversas condições, caracterizando-se por apresentar maior ou menor reatividade (solubilização) ou solubilidade. Algumas dessas fontes, como as aciduladas ou solúveis, podem elevar rapidamente o P da solução do solo a valores indesejáveis (NOVAIS e SMITH, 1999).

O influxo é a necessidade de absorção de P pela planta. O efluxo são as perdas de P já absorvido, e não ocorre em solos tropicais com alto FCP<sup>2</sup>.

FIGURA 1 - EQUILÍBRIO E INTERDEPENDÊNCIAS DE FORMAS DE FÓSFORO NO SOLO



**Fonte:** adaptado de NOVAIS e SMITH (1999)

A retrogradação indica que, em condições específicas, um caminho contrário à disponibilização do P no solo pode ocorrer, passando o P da solução do solo para formas de baixa reatividade, que constituem as formas minerais. Em pH elevado o P da solução pode ser precipitado com cálcio (Ca), em formas de diferentes compostos, porém, baixa solubilidade, o que causa decréscimo do P da solução e aumento das formas minerais de P no solo. Ao se diminuir o pH abaixo de 4,5 ocorre a precipitação na forma de fosfatos de alumínio (Al) e ferro (Fe), insolúveis (NOVAIS e SMITH, 1999).

<sup>2</sup> Fator capacidade de fósforo (NOVAIS e SMITH, 1999).

Os solos mais argilosos e mais intemperizados mostram-se pobres em P e valores nulos de P em solução podem ser constatados. Para um solo específico, este P em solução aumenta com o aumento do P-disponível por um dado extrator químico. Ou seja, “aumenta conforme a melhoria da fertilidade em P do solo” (NOVAIS e SMITH, 1999).

Estes autores ainda salientam que, a utilização de resíduos orgânicos pode alterar a concentração de P na solução do solo e, “à semelhança do que ocorre com as fontes minerais, as fontes orgânicas poderão aumentar ou diminuir o P na solução do solo”. Ao serem mineralizadas, as fontes orgânicas de P, como os restos culturais, ou mesmo da massa orgânica humificada do solo, terão o P constituinte da biomassa somado às concentrações de P da solução do solo. De acordo com estes mesmos autores, a imobilização do P da solução poderá ocorrer temporariamente pela incorporação à biomassa microbiana do solo, que tem sua atividade incrementada por uma fonte de carbono com conteúdo exíguo de P para suprir as necessidades nutricionais dessa microbiota. Dessa forma, “para a mineralização de resíduos, há a necessidade de se imobilizar P por um tempo correspondente ao decréscimo da fonte de carbono, quando a atividade microbiana atinge níveis próximos aos iniciais”. Assim, o P da solução do solo aumenta em seguida, predominando a mineralização sobre a imobilização, “dada a influência significativa da atividade de raízes sobre fontes orgânicas, liberando o P imobilizado”.

O P na solução do solo, aumentado por fontes minerais ou orgânicas, gera um desequilíbrio e conseqüente aumento da adsorção de P. Isso significa um aumento do P-lábil<sup>3</sup>, em equilíbrio com o P da solução do solo. Desse modo, aumenta, concomitantemente, a difusão em direção ao sistema radicular da planta. Entretanto, “a adsorção é um mecanismo bem mais rápido de depleção do P da solução do que a difusão, principalmente em solos com maior capacidade de adsorção de P “ (NOVAIS e SMITH, 1999).

Na retrogradação, ou, na medida em que a planta absorve o P, ou, na imobilização, ou quando ocorrem perdas, o P trocável (P-lábil) reabastece o P retirado da solução no solo e estabelece novo equilíbrio. O aumento do P-lábil no solo aumenta a difusão de P em direção às raízes das plantas. Assim, as formas de P em equilíbrio com a solução do solo constituem-se no estoque de reabastecimento

---

<sup>3</sup> Também denominado por NOVAIS e SMITH (1999), de fator quantidade, ou simplesmente Q.

de P às plantas. Dessa maneira, o P-lábil aumenta o P da solução do solo e vice-versa. Todavia, “os solos diferem quanto à sensibilidade do P-lábil a alterações do P-solução. Essa resistência em mudar o P-lábil, como consequência da mudança no P da solução do solo, ou vice-versa, denomina-se Fator Capacidade de P do Solo (FCP)<sup>4</sup>”, medida pela relação P-lábil/P-solução, ou simplesmente Q/I, sendo I o P da solução ou fator intensidade de P no solo (NOVAIS e SMITH, 1999).

Nos solos mais argilosos, por serem mais intemperizados e por possuírem maior FCP, o valor do P da Solução do solo é mantido mais constante ao se retirar ou adicionar P dela. Qualidades de argila semelhantes em solos com iguais concentrações de P em solução, acarretará “para os solos mais argilosos, maiores valores de P-lábil do que solos com texturas médias, e estes, mais que os solos arenosos” (NOVAIS e SMITH, 1999). Nestes solos é observada uma otimização pela planta das concentrações menores de P disponível na solução do solo e mais biomassa é produzida por unidade de P absorvido em relação aos solos arenosos, com menor FCP. Solos com alto FCP, para o mesmo valor de P-lábil, manterão menores valores de P na solução, embora mais tamponados que nos solos com menor FCP. O P-Lábil do solo tampona o sistema e procura controlar tanto os excessos quanto as carências, quando se considera as características intrínsecas a cada solo (NOVAIS e SMITH, 1999).

Segundo NOVAIS e SMITH (1999) o P não-lábil<sup>5</sup> (NQ) constitui-se num compartimento fechado, ou quase fechado, onde o P é retido, com poucas chances de retorno. É retratado na vasta literatura pertinente como sendo de liberação extremamente lenta. Afirmam ainda que, as perdas de P podem ocorrer por lixiviação, ainda que pequena, e que esse tipo de perda ocorre com maior intensidade nos solos arenosos. Este tipo de perda de P do sistema edáfico ocorre quando o P adicionado com uma fonte qualquer se aproxima da adsorção máxima ou a ultrapassa. A volatilização de P somente ocorre a altas temperaturas.

---

<sup>4</sup>NOVAIS e SMITH (1999) também se referem ao FCP como Poder Tampão de P do Solo, dado pela relação Q/I.

<sup>5</sup>P não-lábil: aquele P que se encontra ligado aos colóides do solo por ligação covalente uni ou bidentada (NOVAIS e SMITH, 1999).

## 2.4 FATORES DE INTERFERÊNCIA NA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO

### 2.4.1 Reações de Adsorção de Fósforo no Solo

A busca da elucidação dos mecanismos que explicassem a retenção de P no solo ocorreu ainda no século XIX (SAMPLE, 1980). Muitos autores consideram os processos de retenção de P no solo como sendo os mecanismos de adsorção e precipitação. São considerados os principais responsáveis por estes processos, os óxidos e hidróxidos de Al e Fe, componentes da fração coloidal dos solos, de acordo com PARFITT (1978).

Os processos de adsorção de P nos solos envolvem o chamado adsorvente (a superfície dos colóides do solo) e a substância adsorvida, o adsorvato. A reação entre íons com a formação de uma nova fase ou um novo composto definido é chamada de precipitação. Podem ser resumidos em: adsorção por óxidos e hidróxidos de Fe e Al, adsorção por aluminossilicatos, adsorção por massa orgânica e precipitação de P no solo. As quantidades de P adsorvidas dependem do tempo de reação, da temperatura, do pH e da concentração de P na solução do solo (SAMPLE et al., 1980).

#### 2.4.1.1 Adsorção de fósforo por oxidróxidos de ferro e alumínio do solo

Duas fases compõem o processo de adsorção: a adsorção por atração eletrostática na superfície de Óxidos e hidróxidos de Fe e Al, constituindo-se numa fase rápida: a primeira fase. Uma segunda fase é marcada por um processo lento e o fosfato é adsorvido aos óxidos por meio de troca dos ligantes, como  $\text{OH}^-$  e  $\text{OH}^{2+}$ . Esta reação forma ligação predominantemente covalente, conhecida como adsorção específica segundo BARROW (1985), quimiossorção ou ainda troca daqueles grupos ligantes da superfície de óxidos por fosfato da solução do solo por meio de ligação covalente (PARFITT, 1978).

BARROW (1985) salienta que o fenômeno da adsorção ocorre lentamente e “pode levar anos para atingir o equilíbrio, devendo ser, também, responsável pela

diminuição da disponibilidade de P de um solo recém-fertilizado”. A formação de P não-lábil, forma de P que não está mais em equilíbrio com a solução do solo, adicionalmente, é denominada fixação de P nos solos, segundo ZEE et al., (1987).

#### 2.4.1.2 Adsorção de fósforo por aluminossilicatos do solo

Os mecanismos de adsorção de P por aluminossilicatos são semelhantes aos que ocorrem com os óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Em função do pH do meio aparecem grupamentos  $\text{OH}^-$  e, ou,  $\text{OH}_2^+$  nas bordas de argilas silicatadas, o que proporciona o mecanismo de adsorção de P por estes minerais (NOVAIS e SMITH, 1999).

#### 2.4.1.3 Adsorção de fósforo por precipitação com ferro, alumínio e cálcio da solução no solo

Considerada por alguns autores como adsorção de P no solo, a precipitação ocorre para diferentes compostos em função do pH do solo. Em baixo pH (< 4,5-5,0), adições de P aos solos pode resultar em precipitação de fosfatos de Al e Fe enquanto que, para menores níveis de acidez (pH > 6,0-6,5) fosfatos insolúveis de cálcio podem ser formados (HAYNES, 1984). Os compostos de P mais importantes em solos ácidos são formados com Fe e Al devido à predominância de óxidos de Fe, Al e caulinita, característicos das regiões tropicais (PARFITT, 1978).

Na solução de solos ácidos o processo de precipitação forma compostos pouco solúveis de P com os íons Al e Fe nela presentes em altas concentrações. Os precipitados formados variam na composição química e possuem produto de solubilidade mais alto que a variscita ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e a strengita ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Desse modo, os íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  destes compostos podem ser liberados lentamente para a solução do solo ao longo dos anos (SANCHEZ e UEHARA, 1980).

SAMPLE e KAMPRATH (1980) salientam que, se as quantidades de Fe e Al existentes na solução do solo são insuficientes para precipitar todo o P, os mecanismos de adsorção específica do P parecem ser mais importantes. Contudo,

relatam adicionalmente que, "não há consenso quanto às contribuições relativas de cada mecanismo de retenção de P". Entretanto, em muitas situações, as reações de adsorção específica são as principais reguladoras das concentrações de P na solução do solo (PARFITT, 1978). Para THOMAS E PEASLEE (1973), sob o ponto de vista da resposta de plantas ao P, os mecanismos não diferem muito. Essa forma de adsorção de P é afetada por muitos fatores incluindo pH, força iônica do eletrólito background e competição aniônica (BARROW, 1985).

Há dependência de pH, da natureza e da quantidade dos minerais presentes na fração argila para formação de compostos de P com Fe, Al e Ca. Trabalho de BRASIL e MURAOKA (1995) indicou "haver correlação entre adsorção máxima de P e algumas propriedades de solo, como o conteúdo de argila e óxidos e hidróxidos de Fe e Al. UDO E UZU (1972) observaram que os óxidos de Al correlacionaram-se mais com a adsorção de P do que óxidos de Fe, o que também serve para as reações com Fe e Al trocáveis, o que pode ocorrer em função da atividade maior dos compostos de Al na adsorção do P que os de Fe.

Segundo HAYNES e MOKOLOBATE (2001) solos ácidos muito intemperizados frequentemente tem baixos níveis de P extraível e contêm grandes quantidades de óxidos hidratados de Al e Fe. Portanto, têm a habilidade de adsorver grandes quantidades do P adicionado. Por essas razões, grandes quantidades de fertilizantes fosfatados são, frequentemente, requeridos para uma ótima produção. Compostos de P com o Ca, como a hidróxiapatita, predominam em solos neutros ou calcáreos (PARFITT, 1978). Estudos realizados no Brasil e em outros países têm demonstrado que outras propriedades de solo também influem nesses processos, tais como conteúdo de matéria orgânica, superfície específica, temperatura e cor do solo (FONTES e WEED, 1996).

## 2.4.2 Fatores de interferência na adsorção de fósforo no solo

### 2.4.2.1 pH e adsorção de fósforo

De acordo com TISDALE et al., (1993), o pH de maior disponibilidade de P no solo situa-se na faixa de 5,5 a 6,8 em água e 5,0 a 6,2 em  $\text{CaCl}_2$ . O aumento do pH

do solo gera um número maior de cargas negativas e um aumento da repulsão e conseqüente redução da adsorção de fosfato pela diminuição do potencial eletrostático do plano adsorção. Assim, a adsorção máxima de P pelo solo deve ser máxima a baixo pH (HAYNES, 1984). Por outro lado, o aumento do pH diminui a forma  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , em relação à  $\text{HPO}_4^{2-}$  que é, então, preferencialmente adsorvida.

#### 2.4.2.2 Envolvimento da matéria orgânica na adsorção de fósforo no solo

##### 2.4.2.2.1 A adição de resíduos orgânicos no solo

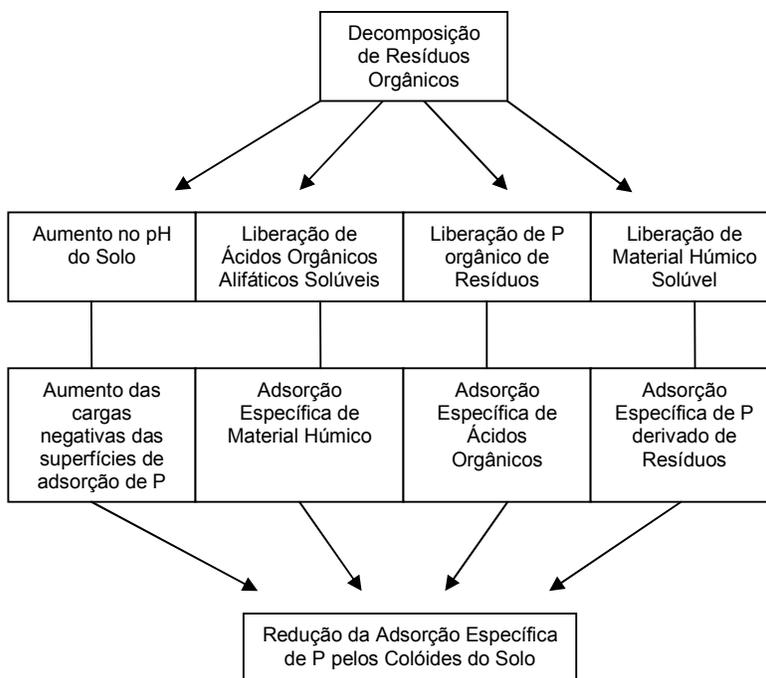
IYAMUREMYE, DICK e BAHAM (1996) relatam que a adição de materiais orgânicos aos solos podem aumentar significativamente a disponibilidade de P para as plantas e diminuir a capacidade de adsorção de P dos solos. As relações entre matéria orgânica (M.O) e adsorção de P têm-se refletido nas correlações positivas encontradas na literatura. Um modelo conceitual foi preconizado para os processos de redução de adsorção e conseqüente aumento da disponibilidade de fósforo no solo (figura 3).

Marcante redução na capacidade de adsorção de P de um solo previamente tratado com níveis crescentes de esterco animal foi indicada por IYAMUREMYE, DICK e BAHAM (1996). A adsorção de P reduzida e o aumento da disponibilidade de P seguiu as aplicações de resíduos orgânicos no solo, o que se imagina ser resultado cumulativo de diversos mecanismos. Isso inclui liberação de P inorgânico de resíduos em decomposição, bloqueio de sítios de adsorção por moléculas orgânicas liberadas de resíduos, elevação no pH do solo durante a decomposição e complexação do Al e Fe solúveis por moléculas orgânicas.

SANYAL e De DATTA (1991) salientam que, "embora possa haver uma razão indireta, por meio de correlação positiva entre teor de argila e M.O no solo, a razão principal parece ser dada ao caráter aniônico da M.O, por via de pontes de cátions como Al, Fe e Cálcio (Ca) a ela adsorvidos, que reteriam o P". Entretanto, já foi demonstrado participação da M.O em reduzir a adsorção de P em solos, por meio de ácidos orgânicos adsorvidos, que bloqueiam os sítios de adsorção de P no solo, como os dos óxidróxidos de Fe e Al (SANCHEZ e UEHARA, 1980). Segundo

IYAMUREMYE, DICK e BAHAM (1996) a equação 1 ilustra o bloqueio específico de sítios de adsorção em oxidróxidos pela reação do oxalato.

FIGURA 2 - MODELO CONCEITUAL DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE REDUÇÃO NA ADSORÇÃO DE FÓSFORO EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS AO SOLO

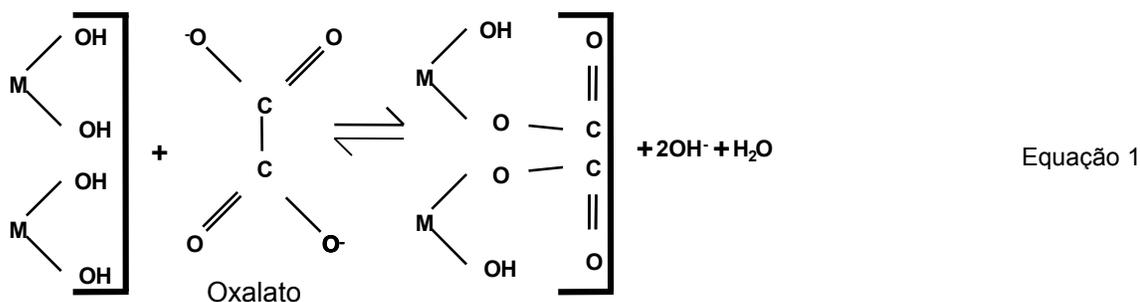


**Fonte:** Adaptado de HAYNES e MOKOLOBATE (2001)

Dessa forma, alguns autores deixam especificada a participação da matéria orgânica na adsorção de P. De acordo com SANYAL e DE DATTA (1991) “embora a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) de um solo aumente com o seu teor de M.O, quando adicionada ao solo na forma de esterco animal, um efeito contrário é observado e, geralmente, diminui a adsorção e aumenta a disponibilidade de P para as plantas”.

## 2.5 FONTES DE FÓSFORO

Na literatura as fontes de P estão classificadas como solúveis ou industrializadas e fontes insolúveis ou fosfatos naturais (NOVAIS e SMITH, 1999). De acordo com SOUZA e LOBATO (2004) duas das principais fontes solúveis de P utilizadas na agricultura são o superfosfato simples (SS) e o superfosfato triplo (ST). Ao serem dispostos nos solos com diferentes características físico-químicas, a parte acidulada dos fertilizantes fosfatados sofre influência em sua eficiência como fonte de P. Dentre este fatores de influência estão o pH do solo, a capacidade de adsorção de P do solo, a precipitação de P no solo e o conteúdo de matéria orgânica.



Em relação aos fosfatos naturais, dentre os fatores de influência na disponibilidade de fósforo no solo estão as condições favoráveis ou não à sua solubilização. Dentre estas, a acidez e a quantidade de P do solo, quantidade de Ca, e a habilidade da espécie cultivada em exsudar ácidos para a dissolução de fosfatos naturais tornando o P mais disponível no solo (SOUZA e LOBATO, 2004).

Estes fosfatos naturais, por sua vez, estão divididos conforme sua origem em: ígnea, metamórfica e sedimentar. Têm sido, atualmente, muito utilizadas in natura, ou seja, sem o tratamento ácido feito pela indústria. Tratamentos estes que, como consequência, torna as fontes de P mais solúveis e com maior disponibilidade do nutriente para as plantas quando aplicados ao solo (NOVAIS e SMITH, 1999).

Os fosfatos naturais também são classificados quanto a sua reatividade, uma característica intrínseca do material. As de origem ígnea ou metamórfica são tidas,

de modo geral, como de baixa reatividade<sup>6</sup> no solo, as de origem sedimentar são consideradas como sendo reativas no solo. Mas, não é somente a origem que determinará reatividade da rocha no solo. Essa característica das rochas fosfatadas é quantificada em função da substituição isomórfica do  $\text{PO}_4^{3-}$  por  $\text{CO}_3^{2-}$ , sendo tão baixa quanto 0,02 para a rocha de Patos de Minas, considerado pouco reativo, e tão alto quanto 0,26 para o fosfato natural de Carolina do norte, considerado reativo. (RAJAN, WATKINSON e SINCLAIR, 1996). Ambas rochas de origem sedimentar.

### 2.5.1 Superfosfato triplo

O superfosfato triplo (ST) é produzido por meio da reação do ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) com a rocha fosfatada moída. As rochas fosfatadas utilizadas para a produção deste e outros fertilizantes fosfatados como os superfosfato simples possuem uma característica comum, que é a de conter um ou mais dos minerais do grupo da apatita. Sua fórmula geral é:  $\text{A}_{10}(\text{XO}_4)\text{Y}_2$ . Muitos elementos podem substituir A, S e Y. Porém, o A é Cálcio e o X é o P, predominantemente. São tipos desses minerais: a fluorapatita, quando  $\text{Y} = \text{F}$ ; hidroxiapatita, quando  $\text{Y} = \text{OH}$ ; cloroapatita, quando  $\text{Y} = \text{Cl}$  (CHIEN e KAUWENBERG, 1992).

Utilizando-se a fórmula da fluorapatita, segundo PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) a reação ocorre como segue:



Segundo os mesmos autores, “o composto predominante no ST é o  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ”, além de outros compostos mais solúveis e disponíveis para as plantas, obtidos a partir da conversão da estrutura da apatita. Possui cerca de 410 g  $\text{kg}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total solúvel em  $\text{CNA}^7 + \text{H}_2\text{O}$  (41%) e 370 g  $\text{kg}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em água (37%) e de 120 a 140 g  $\text{kg}^{-1}$  de Ca total (12 a 14%), podendo estes valores variar em função de autores na literatura. Também possui em sua constituição

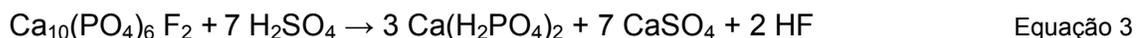
<sup>6</sup> Reatividade é uma característica intrínseca ao FN e, por conseguinte, independente de condições outras, como de solo e planta, a que o FN possa ser submetido (RAJAN et al., 1996).

<sup>7</sup> Citrato neutro de amônio

básica conforme MALAVOLTA (1994): 110 mg kg<sup>-1</sup> de boro (B), 2 mg kg<sup>-1</sup> de Co, 120 mg kg<sup>-1</sup> de Cobre, 38.410 mg kg<sup>-1</sup> de ferro, 300 mg kg<sup>-1</sup> de Mn, 9 mg kg<sup>-1</sup> de Mo e 810 mg kg<sup>-1</sup> de Zn.

### 2.5.2 Superfosfato simples

O superfosfato simples (SS) é produzido por meio da reação do ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) com a rocha fosfatada moída. Para a produção do SS segundo PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) a reação ocorre da seguinte forma:



Segundo as garantias mínimas em BRASIL (1983) o SS apresenta em sua constituição 180 g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em CNA + H<sub>2</sub>O (18%) e 160 g kg<sup>-1</sup> solúvel em água (16%), 180 a 200 g kg<sup>-1</sup> de Ca total (18 a 20%) e 100 a 120 g kg<sup>-1</sup> de enxofre total (10 a 12%). Ainda apresenta os seguintes teores de micronutrientes: 30 mg kg<sup>-1</sup> de B, 4 mg kg<sup>-1</sup> de Co, 20 mg kg<sup>-1</sup> de Cu, 6,565 mg kg<sup>-1</sup> de Fe, 155 mg kg<sup>-1</sup> de Mn, 3 mg kg<sup>-1</sup> de Mo e 78 mg kg<sup>-1</sup> de Zn.

### 2.5.3 Fatores de influência na eficiência agrônômica de fontes solúveis de fósforo

Em geral, a eficiência agrônômica (EA) de fosfatos industriais, como o ST, solúveis em água, é maior a curto prazo. Alguns fatores influenciam diretamente nessa eficiência. HAVLIN et al., (1999) relataram que, íons ortofosfato quando na solução do solo, tanto o oriundo do próprio solo ou de fertilizantes incorporados ao solo, são submetidos à adsorção, à precipitação, à imobilização, à lixiviação e à absorção pelas plantas. Também, adicionalmente, influenciam a eficiência do ST o pH do solo, os teores de matéria orgânica do solo e a granulometria do fertilizante. Estes, dentre outros, também têm parcela de contribuição para o aumento ou diminuição da disponibilidade e, conseqüentemente, da eficiência de fontes solúveis de P, como o ST.

### 2.5.3.1 pH do solo

A faixa de pH entre 5,0 a 7,0, o que pode variar na literatura pertinente, proporciona maior disponibilidade de P às culturas. Duas são as formas de um fertilizante ter sua disponibilidade de P afetada pelo pH: “*atuação nos compostos contidos nos fertilizantes e nos produtos de reação deles e a atuação no desenvolvimento radicular das plantas*” PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004).

### 2.5.3.2 Capacidade de adsorção e precipitação de fósforo do solo

A dissolução do ST e de outros fertilizantes no solo estão condicionadas a sua solubilidade PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004). O ST, não diferente de outras fontes de P quando solubilizadas e conseqüentemente biodisponibilizando o P na solução do solo, podem estar submetido a todos os caminhos relacionados (NOVAIS e SMITH, 1999).

Dissolvendo-se os fosfatos, reagem com o solo por adsorção específica e formação de compostos de menor solubilidade (precipitação), ou seja, são transformados a formas menos solúveis e, por conseguinte, menos disponíveis. PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) citando diversos autores da metade do século XX, afirma que, no caso da precipitação em formas menos solúveis, para o ST é grande a possibilidade de ocorrer com “*cátions derivados das reações de íons trocáveis presentes nas partículas do solo ou da dissolução e decomposição de minerais*”, fenômenos estes que predominam. Os mesmos autores citam que as reações de precipitação geram as “*diferentes características cristalográficas e de produto de solubilidade de compostos formados a partir disso*”. Dentre estes a variscita, metavariscita, monetita, fluorapatita, hidroxiapatita, fosfato octocálcico, etc.

SANCHEZ e UEHARA (1980) indicaram as principais causas que afetam a quantidade de P adsorvido no solo. Sejam elas: a mineralogia da fração argila, conteúdo de argila, conteúdo de colóides amorfos, conteúdo de Al trocável, conteúdo de matéria orgânica e potencial de oxirredução do solo.

Dessa maneira, grande parte do ST aplicada, ou outra fonte solúvel qualquer, é utilizada para suprir o solo com fósforo, pelos processos de fixação, e “*podem*

*influenciar a resposta das plantas ao P aplicado” (PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN, 2004).*

#### 2.5.3.3 Conteúdo de matéria orgânica do solo

A matéria orgânica pode exercer efeitos significativos sobre a disponibilidade de P. Ratificando este fato, TISDALE et al., (1993) publicaram trabalho sobre efeitos de matéria orgânica sobre a fixação de P nos solos. Segundo o autor, isto pode ocorrer principalmente por:

- a) dificuldade de íons fosfato entrar em contato com o sítios de adsorção em função de recobrimento dos mesmos pela de matéria orgânica;
- b) pela formação de complexos organofosforados, mais facilmente absorvidos pelas plantas e;
- c) substituição de íons fosfato por íons orgânicos nos sítios de adsorção.

#### 2.5.3.4 Granulometria do fertilizante

De acordo com relato de PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) a precipitação ocorre de forma intensa em solos tropicais, especialmente quando se trata dos fosfatos totalmente acidulados, como o SS e ST, dada sua elevada taxa de dissolução no solo. Para estas fontes de P a granulometria influencia grandemente nos processos de adsorção e precipitação de P no solo, pois, quanto maior o contato do fertilizante com as partículas do solo e, conseqüentemente, com os pontos de adsorção e precipitação de P, maior será a intensidade de fenômenos de indisponibilização de P no solo. A aplicação na forma de grânulos diminui o volume de solo com o qual o fertilizante reage, o que resulta em menor retenção de P pelo solo. SOUZA (1980), obteve eficiências agronômicas crescentes de 31%, 69%, 109% e 100% superfosfato triplo quando uma dose de 120 mg vaso<sup>-1</sup> de P foi aplicada, respectivamente, na forma de pó e grânulo de 2 mm, 4 mm e 6 mm.

#### 2.5.3.5 Outros fatores

A composição Química, a alta solubilidade dos compostos de P presentes, a forma de aplicação, a mistura de fórmulas dos fertilizantes, e a espécie Vegetal também afetam a eficiência do ST. Esta última, podendo ser mais ou menos eficiente no aproveitamento do P liberado na solução do solo ou do P absorvido PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004).

#### 2.5.4 Fosfatos naturais parcialmente acidulados

Os fosfatos naturais parcialmente acidulados (FP) são obtidos pela adição de quantidade menor de ácido que a estequiométrica requerida para a reação e consequente acidulação completa. Sua constituição básica é o fosfato monocálcico (superfosfato), fosfato bicálcico e outros compostos de P.

A parte solubilizada pela acidulação parcial do FP é semelhante às fontes solúveis totalmente aciduladas. Assim, pode-se aplicar, para esta porção dos FP, as mesmas considerações feitas para o ST. Porém, a parte não acidulada terá a liberação do P condicionada à origem da rocha que serviu de matéria prima, ou seja, o FN “in natura”, além das condições de utilização pela planta da fração solúvel e condições necessárias à dissolução de FN. Desse modo, um fosfato natural não-reativo utilizado para acidulação parcial em função do tempo de aplicação terá menor eficiência agrônômica que um fosfato reativo parcialmente acidulado (NOVAIS e SMITH, 1999).

O fosfato natural parcialmente acidulado, finamente moído, terá maior contato com o solo e maior solubilização da fração solúvel. Porém, acelera-se a formação de P não-lábil. Já os FP granulados terão menor contato com solo e redução liberação da fração solúvel, mas, ocorre a restrição da dissolução da parte solubilizada pela acidulação parcial (NOVAIS e SMITH, 1999).

O suprimento do requerimento inicial de  $^{32}\text{P}$  das culturas com uma fonte solúvel tem mostrado ser efetivo no desenvolvimento precoce do sistema radicular. Desse modo, a planta melhor se estrutura para utilizar P das rochas fosfatadas mais efetivamente, posteriormente (CHIEN e HAMMOND, 1988).

CHIEN et al. (1996), usaram  $^{32}\text{P}$  do superfosfato triplo e mostraram que houve incremento do crescimento de plantas e absorção de P de uma rocha fosfatada de reatividade média para milho e feijão caupi em um solo Haplodult Típico.

A acidez gerada pela hidrólise de fertilizantes solúveis em água poderia solubilizar a rocha fosfatada que não reagiu e, desse modo, prover disponibilidade extra de P para a utilização da planta com o tempo (McLEAN e WHEELER, 1964). Segundo CHIEN e HAMMOND (1988) a presença de P solúvel em água em tais formulações podem contribuir para um melhor desenvolvimento do sistema radicular, resultando em plântulas mais vigorosas e, assim, incrementaria a utilização pela planta do P fertilizante insolúvel.

#### 2.5.4.1 Fatores de influência sobre a eficiência de fosfatos parcialmente acidulados

Segundo NOVAIS e SMITH (1999), para os fosfatos naturais parcialmente acidulados (FPA) aplica-se todas as considerações feitas para o ST quando se considera a parte acidulada do mesmo. Esta parte acidulada, solúvel, ao ser exaurida pela absorção por plantas ou adsorção e precipitação, deixa a liberação do P e a eficiência agrônômica destas fontes de P restritas à velocidade de reatividade da rocha matéria prima, uma característica intrínseca do material fosfatado parcialmente acidulado. Assim sendo, a eficiência no suprimento de P às plantas fica restrita às condições necessárias para dissolução de fosfatos naturais.

#### 2.5.5 Fosfatos naturais

Uma das classificações para os fosfatos naturais (FN) encontrada na literatura se dá em função de sua origem como: de origem sedimentar e origens Ígnea e metamórfica. A solidificação do magma e as erupções vulcânicas dão origem aos FN de origem Ígnea, que se apresentam compactos, sem superfície adicional interna, ou seja, possuem baixa superfície específica e com provável menor quantidade de minerais acessórios (HOROWITZ e MEURER, 2004; RAJAN, WATKINSON e SINCLAIR, 1996). Por isso, são bem pouco reativos no solo. Este motivo, dentre

outros, leva a grande maioria dos trabalhos com fosfatos de origem ígnea demonstrar baixa eficiência agrônômica a curto prazo para culturas anuais.

Os FN de origem sedimentar são originados da “deposição acumulada de camadas de ossadas e esqueletos de animais marinhos no fundo de águas calmas”. Alguma alteração química dos dois primeiros FN darão origem aos FN de origem metamórfica (HOROWITZ e MEURER, 2004).

Os fosfatos naturais, além das formas cálcicas, também se apresentam nas formas de compostos de Ferro e Alumínio, tais como a Variscita ( $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e Estrengita ( $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que, diferente das apatitas, têm sua solubilidade aumentada em função do aumento do pH (OLSEN e KHASAWNEH, 1980).

Contudo, as rochas fosfatadas usualmente não tem desempenho tão bom quanto os fertilizantes solúveis em água com culturas anuais em termos de resposta (CHIEN e FRIESEN, 1992).

#### 2.5.5.1 Parte não-acidulada de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

O fosfato alvorada é um fertilizante obtido por processo de reação química de ácido sulfúrico com a rocha fosfática fosforita, que se constitui na parte não acidulada desta fonte de P e possui  $200 \text{ g kg}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (20%) em média. É recomendada para culturas anuais e perenes. Possui granulometria farelada e pode ser aplicada com os mesmos equipamentos disponíveis para calcário e fertilizantes (SOCAL, 2006).

De acordo com a mesma fonte, a composição química da parte não acidulada deste fosfato de rocha (fosforita) é a seguinte:  $\text{P}_2\text{O}_5$  total =  $200 \text{ g kg}^{-1}$  (20%);  $\text{P}_2\text{O}_5$  em CNA + água =  $90 \text{ g kg}^{-1}$  (9%);  $\text{P}_2\text{O}_5$  em água =  $50 \text{ g kg}^{-1}$  (5%); Cálcio total =  $160 \text{ g kg}^{-1}$  (16%); Enxofre total =  $40 \text{ g kg}^{-1}$  (4%); Manganês total =  $10 \text{ g kg}^{-1}$  (1%).

#### 2.5.5.2 Condições favoráveis à solubilização de fosfatos naturais

Ao inverso do que acontece com os FN de origem sedimentar, os de origem ígnea, “como as apatitas brasileiras, podem apresentar reatividade muito pequena e,

em muitos casos insuficiente para manter uma concentração de P na solução do solo e junto às raízes, satisfatória para a necessidade da planta” (NOVAIS e SMITH (1999).

Os fosfatos naturais de origem sedimentar têm a solubilidade aumentada com o aumento do pH do solo. A acidez necessária para sua solubilização pode ser fornecida pelo próprio solo, na indústria, pela adição de ácidos como o fosfórico e sulfúrico, e também pela própria planta. Correlações significativas ( $R = 0,883$ ) têm sido verificadas entre o grau de acidificação (pH ) do solo por diferentes espécies com o fósforo acumulado na planta, proveniente de diferentes fosfatos. Uma comparação feita entre pH e capacidade do solo reter P e Ca mostrou que esta foi a condicionante mais importante na dissolução do fosfato de Gafsa em laboratório (NOVAIS e SMITH, 1999).

NOVAIS e SMITH (1999) relata que a literatura indica não à aplicação de fosfatos naturais apatíticos brasileiros em solos com pH maior que 5,5. No entanto: “resultados experimentais de quatro anos para soja, cultivada em solos ácidos do RS, comparando aplicações de fosfatos com e sem calagem e como adubação de correção e de manutenção.,na média, para os quatro anos, os efeitos dos fosfatos foram surpreendentes, em qualquer modo de aplicação. Nota-se que os fosfatos naturais proporcionaram melhores produções mesmo em presença de calagem, o que aparentemente iria contra o fato conhecido de que a acidez dos solos favorece a dissolução desses adubos no solo. Ocorre que a cultura da soja beneficia-se com a calagem e nisso deve ser encontrada a explicação para as melhores produções.

Mesmo assim, surpreende-se um pouco que, mesmo fosfatos de baixa reatividade, como Araxá e Jacupiranga, tenham permitido produtividade ao nível das proporcionadas pelo superfosfato” (RAIJ, 1981). Estes resultados podem estar relacionados com o efeito acidificante da rizosfera pela planta e a grande absorção de P e de Ca pela soja (RAIJ e VAN DIEST, 1979).

### 2.5.5.3 Acidez

A acidez é considerada como uma das condições para a dissolução de ou fosfatos naturais de baixa reatividade (ROBINSON et al., 1994). Existe, também,

consistência de que uma das condições favoráveis à dissolução dos fosfatos naturais apatíticos é a aplicação em solos ácidos devido a sua capacidade de fornecimento de prótons, o que pode ser suprido pela planta (BOLAN et al., 1997). Entretanto, a acidez que leva a maior dissolução do fosfato natural, leva também a uma maior formação de P não-lábil.

Também se encontra na literatura que, condições ácidas necessárias à solubilização de fosfatos naturais são concidentes com teores baixos de  $\text{Ca}^{2+}$  e altos teores de  $\text{Al}^{3+}$ . O contato com o solo é outro fator determinante: quanto maior contato, mais P será fixado.

## 2.6 ALTERAÇÕES DE CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SOLOS ÁCIDOS TRATADOS COM LODOS DE ESGOTO

Os biossólidos alcalinizados encontrados em Curitiba são: o lodo de esgoto caleado e o N-Viro Soil. O primeiro é produzido quando a cal hidratada é usada para elevar o pH a 12 (USEPA, 1992). Para a produção do N-Viro Soil é utilizado pó de forno de indústria de cimento com o mesmo objetivo.

Lodos de esgoto alcalinizados têm equivalência de  $\text{CaCO}_3$  relativamente alta (LITTLE, 1991). Podem servir como potencial corretivo da acidez de solos e reduzir a toxidez de alumínio em solos ácidos. Ao elevar o pH do solo, os biossólidos podem precipitar o  $\text{Al}^{3+}$  tóxico na forma não-tóxica de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ou outros minerais de Al (SLOAM e BASTA, 1995). Este fato se deve ao conteúdo de carbono orgânico em lodos de esgoto alcalinamente estabilizados acima de  $250 \text{ g kg}^{-1}$  (25%), o que leva à complexação do  $\text{Al}^{3+}$ .

Os lodos geralmente sofrem mínima decomposição antes da disposição final e, conseqüentemente, contêm grande quantidade de carbono orgânico facilmente oxidável (SLOAM e BASTA, 1995). Efeitos significativos sobre as propriedades químicas do solo têm sido observados quando de sua adição a solos ácidos (CAVALLARO et al., 1993; HUE, 1992 e LITTLE, 1991). O mesmo acontece quando da incorporação de resíduos verdes e de animais a estes solos, reduzindo a toxicidade do  $\text{Al}^{3+}$  e aumentando a produção das culturas (HUE, 1992). HUE et al., (1986) demonstraram a habilidade de ácidos carboxílicos de cadeia curta de

complexar  $Al^{3+}$ , detoxificando-o. Essa habilidade foi classificada como forte para ácido cítrico, oxálico e tartárico. Os ácidos succínico, acético e ftálico foram considerados fracos.

SILVA et al., (2001) observaram aumento nos teores de Ca, P, S e Zn, e da CTC efetiva quando da aplicação de lodo de esgoto em um argissolo cultivado com cana-de-açúcar. Demonstraram também que os efeitos do lodo de esgoto sobre algumas características do solo têm duração de apenas um ano agrícola. Verificaram, também, um aumento nos teores totais de metais pesados do solo. Porém, estes, permanecem muito aquém dos valores considerados perigosos ao ambiente.

Diversos trabalhos publicados, dentre eles, os de MELO e MARQUES (2000) e OLIVEIRA et al., (2002) mostram a eficiência de lodo de esgoto alcalinizado em aumentar o pH do solo, fato que ocorre basicamente em função da reação alcalina dos materiais utilizados no tratamento tais como a cal virgem ( $CaO$ ) ou cal hidratada ( $Ca(OH)_2$ ). SLOAN e BASTA (1995) incubaram doses de N-Viro e lodo calado similares ou pouco acima das contidas nos melhores tratamentos deste experimento, e verificaram aumentos lineares maiores que 2,0 unidades de pH em três solos ácidos de textura média nos EUA, que continuou a aumentar até próximo de 3 meses. Após 6 meses de incubação observaram que os aumentos proporcionados pelo N-Viro foi maior que o lodo tratado com cal. GUEDES et al., (2006) utilizando doses de 10, 20, 40, 80 e 160  $Mg\ ha^{-1}$  de lodo alcalinizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, a despeito de ter obtido efeitos significativos somente a partir de dose 40  $Mg\ ha^{-1}$  de lodo, encontrou que todo solo que recebeu biossólido apresentou maiores valores de pH, obtendo incremento de até 0,3 unidade de pH  $CaCl_2$  na menor dose utilizada. ANJOS e MATTIAZZO (2000) estudando a lixiviação de íons inorgânicos em solo submetido a doses crescentes de lodo, também verificaram acréscimos nos valores de pH do solo. Na dose de 10  $Mg\ ha^{-1}$  obtiveram para Espodossolo e Argissolo, incrementos de , respectivamente, 2 a 2,3 unidades de pH. SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) também verificaram aumentos no pH do solo em função da aplicação de doses crescentes de lodo alcalinizado. Por outro lado FIA, MATOS e AGUIRRE (2005) concluíram que doses de lodo caleado consideradas adequadas para a nutrição de plantas de milho proporcionaram aumentos não desejáveis no pH do solo, e recomendaram que,

primordialmente, o lodo seja recomendado como corretivo de acidez de solo e não um adubo orgânico. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram doses crescentes de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto sem tratamento com cal e de caráter ácido que provocou um decréscimo no valor de pH do solo, apresentando relação inversa com as doses de lodo aplicadas. LOGAN et al., (1997) observaram decréscimo no pH no primeiro ano de aplicação de lodo de esgoto não tratado com cal, após a aplicação de 7,5 e 15  $\text{Mg ha}^{-1}$ .

Resultados obtidos por NASCIMENTO et al., (2004) num Espodosolo Cárbico hidromórfico, textura arenosa e um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, tratados com lodo de esgoto não caleado indicaram que valores de pH em água apresentaram decréscimos lineares e significativos com o aumento da dose de lodo utilizada (0, 10, 20, 30, 40 e 60  $\text{Mg ha}^{-1}$ ). Com a dose de 10  $\text{Mg ha}^{-1}$ , similar às contidas nos tratamentos do presente experimento, obtiveram para Espodosolo e Argissolo, elevações de, respectivamente, 2 a 2,3 unidades de pH do solo.

Alguns trabalhos avaliaram pH em relação a tratamentos de solos com diferentes fontes de P. VIEIRA et al., (2005) utilizaram um Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/argilosa a fim de testar adubação química completa contendo 80  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  do superfosfato simples em relação a doses de lodos de esgoto crescentes. Dentre os parâmetros avaliados esteve o pH  $\text{CaCl}_2$ , que mostrou aumento maior que 0,9 unidade de pH  $\text{CaCl}_2$  após um primeiro cultivo de soja, e uma elevação similar para testemunha e doses crescentes de 0; 1,5; 3,0 e 6,0  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto aplicadas. BELTRÁN, SILVEIRA e PASSOS (1998) incubaram fosfato alvorada, superfosfato simples, superfosfato triplo, fosfato monoamônico e termofosfato magnésiano nas doses de 100, 200 e 300  $\text{mg P dm}^{-3}$  com solo da camada de 0 a 20 cm de uma Areia Quartzosa, textura arenosa, ácido. Foi verificado que, enquanto a testemunha apresentou aumento de 0,2 unidade de pH  $\text{CaCl}_2$ , uma elevação de 0,5 unidade de pH  $\text{CaCl}_2$  foi constatada para o fosfato alvorada em relação ao pH original. Efeito similar ocorreu para o super triplo, independente das taxas de fertilizante utilizadas. Nos tratamentos a partir do fosfato monoamônico, observaram aumento de 0,3 unidades nas maiores doses utilizadas. O superfosfato simples incrementou em 1,2 unidade o pH do solo enquanto que para a maior taxa de P a partir de termofosfato o solo sofreu aumento de até 1,7 unidade

de pH. Com o objetivo de avaliar o efeito de 50, 100, e 400 mg  $P_2O_5$   $kg^{-1}$  superfosfato simples e da rocha fosfatada reativa da Argélia sobre o pH de solos ácidos da Bacia de Carpathian, Hungria, OSZTOICS et al., (2005), obtiveram resultados que indicam que, com o aumento das taxas de aplicação de super simples, ocorreu um decréscimo de pH do solo. Em contraste com este resultado, verificaram que para a rocha fosfatada reativa, o efeito sobre o pH foi o inverso, e aumentos significativos foram verificados à medida em que aumentava as taxas de aplicação a partir desta fonte de P. O pH de um solo da Nova Zelândia foi medido em 10 experimentos de campo, durante 6 anos, nos quais o superfosfato simples e triplo e rochas fosfatadas de Carolina do Norte e de Sechura foram aplicadas anualmente para pastagens. Foram utilizadas taxas equivalentes a 0; 0,5; 0,75; 1,0 e 2,0 vezes a estimativa da necessidade requerida para manutenção de produção máxima de pastagem. O pH do solo decresceu uma média de 0,16 unidade no tratamento testemunha enquanto que não foram observados efeitos significativos nas taxas de aplicação utilizadas com os superfosfatos. Ao contrário disso, as taxas aplicadas de rochas fosfatadas reativas foram efetivas em conter o caimento do pH sendo este efeito incrementado em função do aumento das taxas de aplicação, obtendo-se nenhum abaixamento de pH nas maiores doses dessas rochas. O efeito de rochas fosfatadas em evitar essa redução de pH e consequente aumento da acidez do solo, pode ser atribuída pela diferença na reação de protonação no solo em comparação aos superfosfatos e ao conteúdo de carbonatos nelas presentes (SINCLAIR, et al., 1993). MOREIRA et al., (2002) trabalhando com um Latossolo Amarelo distrófico observou que o termofosfato Yoorin elevou o pH do solo enquanto o superfosfato triplo diminuiu. Os fosfatos naturais de Carolina do norte e de Arad apresentaram reação neutra.

Em relação ao  $Al^{3+}$  trocável SLOAN e BASTA (1995) verificaram que, a pH acima de 4,0 houve diminuição linear e altamente significativa do elemento nesta forma no solo em função de doses crescentes de N-Viro Soil e lodo caleado em três solos ácidos americanos, de texturas arenosa e média. A taxas de aplicação semelhantes às praticadas neste experimento, e a pH acima de 5,0 as concentrações eram negligíveis, o que também ocorreu no presente experimento. Taxas maiores de aplicação reduziram o alumínio abaixo do limite de detecção ( $<0,04$   $cmol_c$   $dm^{-3}$ ). Estes autores ainda observaram que, em menor extensão, um

lodo de esgoto não tratado alcalinamente também reduziu a presença de Al no solo. FIA, MATOS e AGUIRRE (2005) constataram que, com a aplicação de doses 0; 33,6; 67,4; 101,0; 134,7 e 168,4 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo alcalinizado, tal como ocorre com a calagem, proporcionou redução de Al<sup>3+</sup> trocável num Latossolo Vermelho Amarelo distroférrico ácido, devido à precipitação na forma de hidróxidos, reduzindo-se, assim, sua fitotoxicidade. Ao contrário disso, VENÂNCIO GOMES et al., (2005) verificaram que os teores de Al<sup>3+</sup> na camada superficial do solo aumentaram em função da aplicação das doses crescentes de lodo. Porém, o lodo de esgoto utilizado não era tratado alcalinamente e tinha pH alto.

SINCLAIR et al., (1993) observaram que taxas crescentes de rochas fosfatadas reativas aplicadas em diversos solos da Nova Zelândia, cultivados com pastagem, foram efetivas em conter o caimento do pH, sendo este efeito aumentado em função do aumento das taxas de aplicação, obtendo-se nenhum abaixamento nas maiores doses dessas rochas. Concomitantemente observaram que um aumento no pH deve ter reduzido concomitantemente o Al<sup>3+</sup> do solo.

Quanto a acidez potencial de solos GUEDES et al., (2006), trabalhando com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média, verificou que, de maneira geral, quando se aplicou lodo de esgoto os valores de H + Al decresceram, relacionando-se negativamente com pH CaCl<sub>2</sub>. Estes mesmos autores verificaram que a acidez potencial, de 3,4 foi reduzida para 2,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para uma dose de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo, o que pode-se dever à alcalinidade intrínseca do material (pH em média > 10) dada a utilização de elevadas quantidades de óxidos de Ca na fase de tratamentos químico em estações de tratamento de esgotos (OLIVEIRA et al., 2002). Inúmeros trabalhos como os de SLOAN e BASTA (1995); SILVA et al., (1998) e CHRISTIE et al., (2001) que se utilizaram das mais variadas taxas de aplicação de lodos de esgoto alcalinizados no solo, ratificaram os efeitos desse biossólido sobre o pH do solo, aumentando-o e, conseqüentemente, diminuindo a acidez potencial. Resultados contrários foram verificados quando VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo base seca num Argissolo Amarelo promovendo diminuição no pH e conseqüente aumento nos teores de Al trocável e aumento na acidez potencial do solo. Todavia, há que se salientar que o lodo de esgoto utilizado não era tratado alcalinamente e tinha pH baixo. Esse aumento nos teores de Al e H+Al estavam relacionados com a diminuição do pH do

solo, fato que também foi evidenciado por correlações inversas altamente significativas entre os valores destes parâmetros de pH do solo.

Alterações nos teores de Ca no solo não foram verificadas por VENÂNCIO GOMES et al., (2005) que aplicaram doses de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo num Argissolo amarelo e, mesmo com cerca de 2,2% do elemento na massa seca do bio sólido. SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) aplicaram doses de 0, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Verificaram que o Ca contido no lodo e no superfosfato triplo motivaram consideráveis aumentos do teor deste nutriente no solo que, em relação à testemunha, foi até quatro vezes maior aos 146 dias, e oito vezes maior aos 272 dias do tratamento quando empregada a maior dose de lodo. STEHOUWER e MACNEAL (2004) também verificaram que um solo Argiloso dos Estados Unidos tratado com doses de 9, 18 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado e suplemento de fertilizantes inorgânicos adicionados aos tratamentos teve os teores de Ca aumentados concomitantemente ao aumento das doses de lodo de esgoto. Estudando um Latossolo Vermelho eutroférico, BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002b) concluíram que, dentre as variáveis de solo afetados pela adição de 36 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado, estava o Ca<sup>2+</sup> trocável cujos teor aumentaram em função das doses aplicadas. De acordo com uma análise de componentes principais de fertilidade do solo e a partir de procedimento de rotação pela máxima variância, GUEDES et al., (2006) verificaram o efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto calcado sobre os componentes acidez do solo (Ca<sup>2+</sup>, o Al<sup>3+</sup> e pH). Estes autores mostraram que influência significativa somente ocorreu a partir da dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup>, exceto nesta mesma dose aplicada superficialmente, que não se mostrou diferente das menores doses (10 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>) e do tratamento-controle e adubação mineral. Quando estes mesmos autores analisaram um segundo componente, que inclui o Ca<sup>2+</sup>, P, C, Mg<sup>2+</sup>, SB e CTC do solo, indicaram que essas variáveis apresentaram comportamento igual em conformidade com os tratamentos aplicados e encontraram alta correlação entre o teor de Ca<sup>2+</sup> no solo e a soma de bases, indicando que este parâmetro de solo é, praticamente, determinado pelo Ca<sup>2+</sup>. Neste mesmo trabalho ficou indicado que “o teor de Ca<sup>2+</sup> aumentou com as doses de bio sólido até uma aplicação de 80 Mg ha<sup>-1</sup> e não houve diferenças significativas entre tratamentos

numa dose referência de 40 Mg ha<sup>-1</sup> nem entre as doses de 80 e 160 Mg ha<sup>-1</sup>". Segundo os autores, "ao se considerar o elevado teor de Ca<sup>2+</sup> no biossólido, a partir de 80 Mg ha<sup>-1</sup> pode ter ocorrido uma saturação do complexo de troca por esse elemento".

Com referência ao Mg<sup>2+</sup> trocável SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) aplicaram doses de 0, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Observaram que o Mg<sup>2+</sup> também foi responsável por significativo aumento da soma de bases do solo a medida que aumentaram as doses de lodo. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) incorporou ao solo 135,5 kg ha<sup>-1</sup> de Mg, a partir de dose de 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e verificaram que o teor desse nutriente foi inferior ao encontrado no solo que não recebeu adubação com lodo. Este decréscimo no teor deste nutriente pode estar associado à lixiviação, uma vez que cátions como Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup> podem deslocá-los de sítios de adsorção para a solução do solo, tornando-o passível de percolação às camadas mais profundas do solo. SIMONETE et al., (2003) aplicaram doses de 0; 16,05; 32,10; 48,15; 64,20 e 80,25 g vaso<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, respectivamente 0, 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha<sup>-1</sup>, base seca, a um Argissolo Vermelho-Amarelo em Casa de vegetação. Observaram aumento no teor trocável de Mg com o aumento das taxas de aplicação de lodo de esgoto no solo e um aumento proporcional na soma de bases do solo. Numericamente, a cada dose de lodo de esgoto aplicada houve aumento de 0,01 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no teor de Mg, que teve participação no aumento verificado da soma de bases a cada dose aplicada do resíduo.

Uma variável frequentemente mensurada quando se adiciona biossólido ao solo é o carbono orgânico. GUEDES et al., (2006) verificaram que, onde foram incorporadas doses de 10, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, houve diminuição do carbono orgânico em relação às doses de 80 e 160 Mg ha<sup>-1</sup>, concluindo que o fato pode ter ocorrido em função do efeito "*priming*", ou, a diminuição do carbono do solo após adição de material orgânico. Resultados de trabalhos indicam que pode haver aumento ou diminuição de teores de carbono no solo em função qualidade do lodo nele incorporado. FONTAINE, MARIOTTI e ABBADIE (2003) mostraram que a adição de nutrientes e C facilmente assimilável, como açúcares solúveis, aminoácidos, extratos das raízes ou da rizosfera, não alteram as taxas de

decomposição da matéria orgânica do solo. BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002b) indicaram que o teor carbono no solo aumentou em função das doses de lodo caledo, sendo os melhores resultados alcançados nas parcelas que receberam  $36 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . NASCIMENTO et al., (2004) observaram aumentos significativos nos teores de matéria orgânica de solos que, para uma dose mais alta utilizada ( $60 \text{ Mg ha}^{-1}$ ), os teores apresentaram aumentos de 53% em Espodossolo e 62 % em Argissolo. FAVARETTO e DESCHAMPS (1997) observaram redução nos teores de carbono no solo com o aumento de doses de lodo de esgoto em função degradação da matéria orgânica, sem, entretanto, constatar-se diferenças significativas para este parâmetro entre adubação mineral e altas doses de lodo utilizadas ( $32, 64$  e  $96 \text{ Mg ha}^{-1}$  base úmida).

Em relação ao P, SILVA et al., (2002) verificaram que, de maneira geral, a aplicação de lodo de esgoto ao solo tem propiciado elevação de teores do nutriente no solo e a eficiência de lodo de esgoto por eles verificada foi 25 % superior à do superfosfato triplo como fonte de fósforo para o milho. GUEDES et al., (2001) encontraram teores de P extraível no solo que recebeu dose de  $10 \text{ Mg ha}^{-1}$  de lodo significativamente maior que no solo de tratamento testemunha, sem lodo. Para HUE (1995), “além de ser fonte de P, o lodo pode diminuir a adsorção do elemento em solos, em função do elevado conteúdo de matéria orgânica, que poderá fornecer íons orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de adsorção”, aumentando a disponibilidade do elemento. IYAMUREMYE et al., (1996) relatam que a adição de materiais orgânicos aos solos podem aumentar significativamente a disponibilidade de P no solo e diminuir a capacidade de adsorção de P do solo. HAYNES e MOKOLOBATE (2001) propuseram um modelo conceitual de redução de adsorção de P a partir da decomposição de resíduos orgânicos no solo, aumentando sua disponibilidade (Figura 3 acima). NASCIMENTO et al., (2006) obtiveram aumentos significativos nos teores de P extraível a partir de doses crescentes de lodo, obtendo duplicação de teores originais presentes no solo para uma dose de  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$ , o que foi verificado também por BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002). Todavia, verificou-se também que, mesmo para a dose de  $60 \text{ Mg ha}^{-1}$ , os teores de P disponíveis no solo ainda foram baixos, a partir do que, sugeriu-se doses elevadas de lodo, ou suplementação com fertilizantes minerais, para obtenção de altas produtividades das culturas.

VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto em Argissolo Amarelo e verificaram aumento linear do teor de fósforo na camada superficial do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por CRUZ et al., (2002) que, estudando a fertilidade de um solo fertilizado com lodo de esgoto, observaram incrementos de teores de P no solo, mostrando-se os tratamentos com o biossólido superiores à adubação mineral. SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) aplicaram doses de 0, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Com a “aplicação de 66 kg ha<sup>-1</sup> de P, contido em 20 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado, o nível de suficiência de P no solo saiu de muito baixo para médio. A aplicação de 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo o teor de P do solo aumentou ainda mais, mas sem mudar a classe de teor já atingida com a dose de 20 Mg ha<sup>-1</sup>”. LINDSAY e LOGAN (1998) aplicaram taxas de 0; 7,5; 15; 30; 60; 90; 120; 150; 188; 225 e 300 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado em um solo silto-argiloso de Miami e demonstraram inúmeros benefícios de lodo de esgoto para espécies cultivadas e para algumas características químicas do solo.

VIEIRA et al., (2005) trataram um Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/argilosa (EMBRAPA, 1999) e cultivaram soja com dose zero de lodo de esgoto; soja com 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja com 3 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e soja com adubação química. Os teores de P no solo no primeiro ano de cultivo foram maiores nos tratamentos com lodo. Estes autores também verificaram que, na análise de solo antes da semeadura da soja, no segundo ano de cultivo, os teores de P nos solos que receberam lodo foram em média 23% e 45% maiores do que a média dos tratamentos testemunha.

STEHOUWER e MACNEAL (2004) aplicaram doses semelhantes às praticadas neste experimento de 9, 18 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo alcalinizado. CaHPO<sub>4</sub> foi adicionado aos tratamentos em quantidade equivalente do nutriente que seria suprido pelo lodo. Todos os tratamentos aumentaram os teores de P no solo.

WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) trataram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação com 0, 25, 50, e 75 kg P ha<sup>-1</sup>, combinados ou não com resíduo de galinheiro, resíduo de curral, palha de milho e composto na dose de 2 Mg ha<sup>-1</sup> peso seco. O P extraível aumentou linearmente com o aumento das doses de P a partir da rocha fosfatada de Minjingu tanto para amostras

coletadas a 4 quanto as coletadas a nove semanas do estabelecimento dos tratamentos. Os efeitos da combinação de materiais orgânicos com a rocha fosfatada foram variáveis. Porém, a combinação de esterco de galinheiro + rocha proporcionou mais P extraído em ambos tempos de coleta. Estes mesmos autores, em estudos de campo, trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxa de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada de Minjingu. Os valores de P extraível obtidos com a aplicação de ambos, materiais orgânicos e P, em geral, foram muito baixos. No entanto, a quantidade de P extraível com a aplicação de P desta rocha aumentou. No tratamento controle do solo da localidade de Busia, no Kenya, o P extraível aumentou de 1,96 mg kg<sup>-1</sup> de solo da primeira estação de cultivo de milho para 3,47 mg kg<sup>-1</sup> numa segunda estação. No tratamento com 60 kg P ha<sup>-1</sup> aumentou de 3,30 mg P kg<sup>-1</sup> na primeira estação para 5,01 mg P kg<sup>-1</sup> na segunda estação. Na localidade de Siaya os valores correspondentes foram: 1,6 para 99 mg P kg<sup>-1</sup> de solo no tratamento controle e de 3,5 para 4,12 mg P kg<sup>-1</sup> de solo na parcela que recebeu 60 kg P ha<sup>-1</sup>. As amostras coletadas a diferentes intervalos mostraram que o P extraível aumentou desde que os tratamentos foram aplicados. Este fato foi mais pronunciado nas parcelas que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> tanto para a rocha sozinha ou em combinação com 2 Mg ha<sup>-1</sup> de ambos esterco de curral e restos culturais de milho.

Doses crescentes (0,0; 0,34; 0,68; 1,40; 2,64 e 0,5 Mg ha<sup>-1</sup>) de lodo de esgoto alcalinizado (N-Viro Soil) foram utilizadas por NISHIMURA e LUCCHESI (2002) para aplicação simultânea ou em substituição parcial a adubos sintéticos com o objetivo de avaliar a disponibilidade do P Mehlich-1 no perfil de um Cambissolo háplico do Paraná. Os resultados mostraram que, 4 meses após a aplicação, não houve diferença significativa entre tratamentos para as diferentes camadas de solo, mesmo para as maiores doses e, principalmente, para a camada de 0,0 a 5,0 cm. Ficou indicada somente uma tendência de aumento nos teores de P extraível na dose de 0,5 Mg ha<sup>-1</sup> + 70 % da adubação sintética, a qual constava de 68,6 kg de fosfato monoamônico como fonte de P. Nenhum tratamento proporcionou alteração no teor de P foliar, mostrando-se adequadas e semelhantes para todos os tratamentos. Quanto a produtividade do milho (*Zea mays* L.) obtida com o bio-sólido, não se

verificou diferenças em relação à adubação sintética. Não houve correlação significativa entre a produção da cultura do milho e as doses crescentes de LA, obtendo-se somente uma tendência de incremento com as maiores doses.

#### 2.6.1 Alterações nas características químicas de solos ácidos adubados com fertilizantes fosfatados

Dependendo da fonte de adição de P, também podem ou não terem exercido influência sobre o pH do solo. SINCLAIR et al., (1993) mediram o pH de diversos solos da Nova Zelândia em 10 experimentos de campo, durante 6 anos, nos quais o superfosfato simples e triplo e fosfatos naturais reativos de Carolina do Norte e de Sechura foram aplicadas anualmente para pastagens a taxas equivalentes a 0; 0,5; 0,75; 1,0 e 2,0 vezes a estimativa da necessidade requerida para manutenção de produção máxima de pastagem. O pH do solo decresceu uma média de 0,16 unidades no tratamento testemunha enquanto que não foram observados efeitos significativos nas taxas de aplicação utilizadas com os superfosfatos. Ao contrário do ocorrido com estas fontes de P, as taxas aplicadas de rochas fosfatadas reativas foram efetivas em conter o caimento do pH, sendo este efeito incrementado em função do aumento das taxas de aplicação, obtendo-se nenhum abaixamento de pH nas maiores doses dessas rochas. Segundo os autores, o efeito de rochas fosfatadas em evitar essa redução de pH e conseqüente aumento da acidez do solo, pode ser atribuída pela diferença de protonação em comparação com os superfosfatos e ao conteúdo de carbonatos nelas presentes.

O pH do solo foi avaliado em experimento desenvolvido por BELTRÁN et al., (1998), no qual foram incubados fosfato alvorada, superfosfato simples, superfosfato triplo, fostato monoamônico e termofosfato magnésiano nas doses de 100, 200 e 300 mg P dm<sup>-3</sup> com solo da camada de 0 a 20 cm de uma Areia Quartzosa, textura arenosa, ácido. Enquanto que a testemunha apresentou aumento de apenas 0,2 unidade de pH CaCl<sub>2</sub> em relação ao pH original, obtiveram incrementos de 0,5 unidades de pH CaCl<sub>2</sub> para o fosfato alvorada, sendo verificado efeito similar para o ST, independente das taxas de fertilizante utilizadas. Para o fosfato monoamônico, observaram aumento de 0,3 unidades nas maiores doses utilizadas. O superfosfato

simples elevou o pH  $\text{CaCl}_2$  do solo em até 1,2 unidade enquanto que para a maior taxa de termofosfato o pH do solo subiu em até 1,7 unidade.

Ainda OSZTOICS., et al., (2005) avaliaram o efeito de 50, 100, e 400 mg  $\text{P}_2\text{O}_5$   $\text{kg}^{-1}$  superfosfato simples e da rocha fosfatada reativa da Argélia sobre o pH de solos ácidos da Bacia de Carpathian, Hungria. Os resultados obtidos indicaram que, com o aumento das taxas de aplicação do fertilizante, um decréscimo no pH do solo foi observado enquanto que, contrastando com este resultado, verificaram que para a rocha fosfatada reativa, o efeito sobre o pH foi o inverso, sofrendo aumentos significativos a medida em que aumentava as taxas de aplicação.

MOREIRA et al., (2002) trabalhando com um Latossolo Amarelo distrófico observou que o termofosfato Yoorin elevou o pH do solo enquanto o superfosfato triplo diminuiu. Os fosfatos naturais de Carolina do Norte e de Arad apresentaram reação neutra.

## 2.7 EFEITOS DE VARIÁVEIS QUÍMICAS DE SOLOS SOBRE A CULTURA DE FEIJOEIRO

O pH exerce efeito sobre a disponibilidade de nutrientes e, a pH muito baixo as plantas não absorvem Ca e P. Todas as unidades experimentais mostraram, no início de ciclo, acentuada queda de folhas e nítida senescência e deficiência de P nas folhas mais velhas, excepcionalmente nas testemunhas. O fato pode dever-se à translocação deste nutriente, bastante móvel nas plantas (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997). ARNON (1953)<sup>8</sup> citado por MALAVOLTA (2004) salientaram que “quando o suprimento externo de P torna-se limitante ocorre uma redistribuição do fósforo contido na planta e o fosfato é retirado das células mais velhas, metabolicamente menos ativas e se move para as mais novas. Assim os sintomas de falta de P são observados inicialmente nas folhas mais velhas, mais baixas”.

Ainda MALAVOLTA et al., (1980) e OLIVEIRA et al., (1985) relataram que, o desenvolvimento do feijoeiro e seu rendimento são seriamente afetados quando

---

<sup>8</sup> ARNON, D. I. **The physiology and biochemistry of phosphorus in green plants**. In: PIERRE, W. H., NORMAN, A. G. (Ed.). Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition. N. Y: Ac. Press, 1953, p. 1-42.

ocorre a deficiência de algum elemento essencial. Para OLIVEIRA et al., (1988), o feijoeiro cultivado em solo com baixo pH pode apresentar sintomas de deficiência de micronutrientes. Segundo OLIVEIRA et al., (1981a) e MESQUITA FILHO (1982) o feijoeiro quando cultivado em solo ácido mostra, além de sintomas de deficiência de Ca, Mg, P e Mo, toxidez de Al e Mn presentes em altas concentrações nestes solos. A deficiência de P está relacionada, dentre os problemas mais comuns, com o Ca, Mg e Zn (ZABOUROUSCI e LOPEZ, 1982). Este fato deve ter refletido no estado nutricional das plantas, que desenvolveram poucos ramos, podendo ter influenciado significativamente na altura de plantas e, conseqüentemente, na produção de grãos e massa seca total da parte aérea de feijoeiro.

## 2.8 EFEITOS DA APLICAÇÃO DE LODOS DE ESGOTO SOBRE OS COMPONENTES DE PRODUÇÃO DAS CULTURAS

Lodos de esgoto têm sido testado para várias culturas e seus efeitos na produtividade já foi verificado para diversas condições de solo e clima, doses, tipo de material, solo e culturas. BERTON, CAMARGO, VALADARES (1989) encontrou que a aplicação do lodo proporcionou aumento na produção de massa seca de milho.

WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) trataram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação com 0, 25, 50, de 75 kg P ha<sup>-1</sup> oriundos de rocha fosfática, combinados ou não com resíduo de galinheiro, esterco de curral, palha de milho e composto em doses iguais de 2 Mg ha<sup>-1</sup> de peso seco. A produção de massa seca de milho com os diferentes materiais orgânicos e suas combinações variaram mas, na média o esterco de galinheiro + rocha proporcionou maior produção de massa seca seguido da combinação de esterco de curral + rocha. A combinação com um composto ou restos culturais de milho proporcionaram produções iguais a um controle. O esterco de galinheiro combinado com 50 kg P ha<sup>-1</sup> proporcionou as maiores produções de massa seca de milho. De maneira geral, o aumento das taxas de P oriundo de rocha fosfatada, com ou sem os materiais orgânicos aumentaram linearmente a produção de massa seca do milho em casa de vegetação.

ZAPATA e ZAHARAH (2002) aplicaram, em casa de vegetação, 2 lodos de esgoto sozinhos e em mistura com o superfosfato triplo. Os tratamentos constaram de: misturas superfosfato triplo (ST) + lodo de esgoto irradiado (SLI), rocha fosfatada da Flórida (PR) + lodo de esgoto irradiado (SLI), superfosfato triplo (19,6% P), rocha fosfatada da Flórida (PR 14,2% P total), lodo esgoto não irradiado (SL, 2,73% P total), Lodo de esgoto irradiado (SL, 2,73% P), todos em duas doses de P: 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo e 150 mg P/kg solo. Não se observou diferenças significativas na produção de massa seca entre tratamentos 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. Porém, todos os tratamentos com P foram superiores ao controle, sem aplicação de P. Quanto à produção de massa seca produzida pelo trigo não houve diferença estatística entre as misturas ST + SLI e PR + SLI para a dose de 50 mg P/kg Solo. À taxa de 150 mg P/kg de solo o SL aplicado sozinho produziu quantidade de massa seca significativamente maior que o ST sozinho. Quando se considerou a dose de 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo com PR e ST observou-se produções de massa seca maiores que as obtidas com lodo sozinho e não estatisticamente diferentes para ambas as misturas.

SOUMARE et al., (2003) trataram 2 solos agrícolas da Malásia onde utilizou um controle não fertilizado para ambos solos, NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> do composto, NPK + 100 Mg ha<sup>-1</sup> do composto, PK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, NP + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, P + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto sozinho, onde NPK representa a solução de Hoagland não modificada. A produção de massa seca foi aumentada significativamente pelo composto e a fertilização mineral. A aplicação de 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto sozinho aumentou a produção de massa seca de 10% e 17,5% enquanto que a adubação mineral NPK aumentou em 69,7% e 65% para os solos de Gao e Bgda, respectivamente. A mistura do composto com os fertilizantes minerais NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto para o solo de Gao e NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto para o solos de Bgda, levaram às maiores produções de massa seca.

## 2.9 EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODOS DE ESGOTO E MATERIAIS ORGÂNICOS APLICADOS ISOLADAMENTE OU EM MISTURA COM FONTES DE FÓSFORO

Os biossólidos, em geral, têm sido considerados fontes satisfatórias para o suprimento de nutrientes às plantas. A aplicação de taxas adequadas pode resultar adequada disponibilidade de nutrientes e colheita, evitando-se, inclusive, os problemas de ordem ambiental. A capacidade de materiais como lodos em suprir nutrientes depende de vários fatores inerentes ao próprio lodo e às características do solo, demanda de nutrientes das plantas e do tempo e disposição de tais biossólidos (OBERLE e KEENEY, 1994).

Os lodos de esgoto têm sido utilizados como fertilizante por muitos anos (KIRKHAM, 1982). É de composição química muito variável dada sua origem e forma de tratamento (FROSSARD et al., 1996). Em relação ao fósforo são relativamente escassas informações sobre a disponibilidade quando oriundo destes materiais.

ZAPATA e ZAHARAH (2002) avaliaram, em casa de vegetação, a eficiência agronômica relativa pela técnica de diluição isotópica de rochas fosfatadas e lodo de esgoto aplicados sozinhos e em mistura com o superfosfato triplo. Os tratamentos constaram de: misturas superfosfato triplo (ST) + lodo de esgoto irradiado (SLI), rocha fosfatada da Flórida (PR) + lodo de esgoto irradiado (SLI), superfosfato triplo (19,6% P), rocha fosfatada da Flórida (PR 14,2% P total), lodo esgoto não irradiado (SL, 2,73% P total), Lodo de esgoto irradiado (SL, 2,73% P), todos em duas doses de P: 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo e 150 mg P/kg solo. As misturas foram feitas com relação ao P na taxa de 1:1 e na taxa mais alta na proporção de 1:2, com maior proporção reservada para o fosfato natural. Na mistura de SL + PR, o fosfato natural foi aplicado em maior proporção. Um controle (sem adição de P), onde somente a solução portadora do <sup>32</sup>P foi adicionada estiveram incluídas como referência para o método isotópico de avaliação da eficiência agronômica. Não se observou diferenças significativas na produção de massa seca entre tratamentos 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. Todos os tratamentos com P foram superiores ao controle, sem aplicação de P. Quanto à produção de massa seca pela cultura do trigo não houve diferença estatística entre as misturas ST + SLI e PR + SLI para a dose de 50 mg P kg<sup>-1</sup> de

solo. À taxa de 150 mg P/kg de solo o SL aplicado sozinho produziu quantidade de massa seca significativamente maior que o ST sozinho. Quando se considerou a dose de 150 mg P/kg de solo com PR e ST observou-se produções de massa seca maiores que as obtidas com lodo sozinho e não diferentes estatisticamente para ambas as misturas. Em relação à absorção de P às taxas de 50 mg P kg solo<sup>-1</sup>, os menores dados de absorção foram para os tratamentos com SL e SLI sozinhos. Valores intermediários foram obtidos com os tratamentos contendo ST na mistura. À taxa de 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo, a maior absorção de P foi também obtida com o ST, com 46 % de aumento em relação à taxa de 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. Efeito este, devido ao consumo de luxo pois não houve aumento da produção de massa seca. As menores taxas de absorção de P foram obtidas com os tratamentos SL, SLI e PR sozinha e a mistura SLI + PR, com absorções similares de P em todos eles. Valores intermediários ao ST sozinho e aos menores valores obtidos acima especificados foram observados para as misturas contendo ST, resultado estes similares ao obtidos com taxas baixas de P (50 mg P/kg de solo). Para a eficiência agrônômica relativa (EAR), calculada com base na produção de massa seca e P total acumulado pelas fontes aplicadas, não se encontrou diferenças significativas entre os valores de EAR para todas as fontes à taxa de 50 mg P/kg de Solo. À taxa de 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo, somente a EAR do SL foi 19 % maior que a do ST, enquanto que as demais, inclusive as misturas ST + SLI ou ST + PR foram similares. Os valores de EAR baseados na absorção de P em ambas taxas de aplicação mostraram que a maior efetividade foi para o ST. Baseado nestes valores, as fontes de P que não o ST mostraram iguais eficiências, mas foram menos efetivas que o ST em ambas taxas de aplicação de P. Os tratamentos contendo ST em mistura tiveram eficiência intermediária e não houve diferença estatística entre o SL, SLI e rocha fosfatada da Flórida, de média reatividade. Os autores chegaram à conclusão de que, a adição de P solúvel e rocha fosfatada em lodo de esgoto não aumentaram a absorção de P dessas fontes sob estas condições experimentais.

SOUARE, TACK e VERLOO (2003) conduziram experimento em vasos visando avaliar o efeito de composto de resíduo sólido urbano misturado com adubação mineral sobre a produção massa seca de azevém (*Lolium perenne* L.) cultivado em dois solos agrícolas da Malásia. Dentre os tratamentos incluíram-se um controle não fertilizado, NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> do

composto, NPK + 100 Mg ha<sup>-1</sup> do composto, PK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, NP + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, P + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto sozinho, onde NPK representa a solução de Hoagland não modificada. A produção de massa seca foi aumentada significativamente pelo composto e a fertilização mineral. A aplicação de 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto sozinho aumentou a produção de massa seca de 10% e 17,5% enquanto que a adubação mineral NPK aumentou em 69,7% e 65% para os solos de Gao e Bgda, respectivamente. A mistura do composto com os fertilizantes minerais NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto para o solo de Gao e NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto para o solos de Bgda, levaram às maiores produções de massa seca. Tendo a concentração de P nas plantas variado em função do tipo de solo utilizado. Observou-se, também, aumentos no P disponível e massa orgânica do solo, além de Ca, Mg, micronutrientes e pH em todos os tratamentos que receberam composto.

De modo geral a literatura salienta a necessidade de estudos de campo numa variedade de solos, condições climáticas e manejo agrônomo a fim de testar hipóteses posteriores do aumento de absorção de P em misturas de resíduos com fontes de P. Também, pode-se inferir que, no campo, espécies de planta cultivadas podem diferir amplamente em suas habilidades para acessar o pouco P disponível no solo em uma rotação de culturas ou sistemas de produção (REDDY, NYAKATAWA e REEVES, 2000).

Em relação às fontes de P, comumente encontradas no mercado, de maneira geral, a literatura aponta o ST como fonte de referência em cálculos de IEA (PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN, 2004). WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) cultivaram milho em um Orthic Ferralsol, textura média, fertilizado com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho e esterco de curral complementados com 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada reativa de Minjingu. Em duas localidades observou-se que a rocha combinada com estes materiais aumentou significativamente sua eficiência agrônomo em comparação com superfosfato triplo. Entretanto, a aplicação da rocha sozinho e em combinação com esterco de curral ou restos de milho a taxas de 1 Mg ha<sup>-1</sup> diminuiu a eficiência da rocha abaixo do superfosfato triplo. A maior eficiência foi obtida na localidade de Siaya, quando a dose de P da rocha fosfatada foi combinada com restos culturais de milho a uma taxa de 2 Mg ha<sup>-1</sup>, proporcionando índice de eficiência agrônomo de 294% e a

rocha combinada com dose igual de esterco de curral propiciaram índice de 211%. Na localidade de Busia, a eficiência da rocha foi menor se combinada com esterco de curral a  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$ , gerando índice de eficiência agrônômica de 170%. A combinação da dose de P com  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de restos culturais de milho proporcionaram um índice de 151%. Estes autores concluíram que o baixo conteúdo de P nos solos do oeste do Kenya limitam seriamente a produção de milho, e sugeriram, no entanto, que a eficiência da rocha fosfatada de Minjingu pode aumentar ao ser combinada com materiais orgânicos comumente disponíveis para pequenos produtores naquelas localidades. Foi observado que o uso de materiais orgânicos sozinhos pode incrementar a produção de milho muito embora os materiais não possam suprir todo o P absorvido pelas colheitas.

ZAPATA e ZAHARAH (2002) conduziram um experimento em casa de vegetação a fim de avaliar a eficiência agrônômica relativa de fontes alternativas de P. Estes autores trataram um Dystric Eutrocrepts arenoso húngaro com misturas de superfosfato triplo + rocha a  $50 \text{ mg P kg}^{-1}$  (1:1) e  $150 \text{ mg P kg}^{-1}$  (1:2), super triplo + lodo de esgoto irradiado a  $50 \text{ mg P kg}^{-1}$  (1:1) e  $150 \text{ mg P kg}^{-1}$  (1:2) e lodo de esgoto irradiado a  $50 \text{ mg P kg}^{-1}$  (1:1) e  $150 \text{ mg P kg}^{-1}$  de solo. Foi utilizado um controle sem adição de P e uma solução de  $^{32}\text{P}$  foi incluída como fonte de referência para o método isotópico. O solo tratado foi cultivado com trigo (*Triticum vulgare*). Calculados com base na massa seca da parte aérea, os autores não observaram diferenças significativas entre índices de eficiência agrônômica para a massa seca produzida pelas várias fontes de P à taxas de  $50 \text{ mg P kg}^{-1}$  de solo. À taxas de  $150 \text{ mg P kg}^{-1}$  de solo verificou-se que somente o índice para o tratamento com lodo foi 19% maior que o ST, enquanto que o obtido com o ST sozinho ou misturas de ST + SLI ou ST + rocha foram similares. Os tratamentos contendo esta fonte de P na mistura tiveram eficiência intermediária, não havendo diferenças entre SL, SLI e a rocha sozinha.

## 2.10 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FONTES DE FÓSFORO

PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) salientam que fatos reais de reação e disponibilidade do P aplicado não são considerados para a previsão da eficiência dos fertilizantes, como nos modelos teóricos. Os métodos de avaliação utilizados empregam extratores químicos ou plantas. Isto é, “*são relações matemáticas que envolvem a resposta das plantas (produtividade) e aplicação do fertilizante utilizando-se dados químicos ou experimentais*”.

Os métodos que envolvem plantas baseiam-se, principalmente, em possíveis aumentos na quantidade de massa seca, P acumulado ou produtividade, proporcionados pela aplicação de P em relação a uma testemunha sem P ou a uma fonte-padrão de P.

PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) relata vários métodos de avaliação de eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados, cada um com suas características peculiares de uso. Estes métodos podem ser subdivididos em:

- a) métodos baseados na absorção de nutrientes: método que avalia a quantidade de nutrientes que é efetivamente absorvida pela planta, tendo-se que, obrigatoriamente, relacionar-se com a produtividade para possuir importância agronômica. Dentre estes, o mesmo autor cita: o Método Indireto ou por Diferença, que poderia levar à uma superestimativa do efeito do P do fertilizante, que pode modificar o P original do solo; e o Método Direto, utilizando-se de Isótopos que, por seu elevado custo e dificuldade operacional torna-se inconveniente.
- b) métodos baseados nas Medidas de Produtividade e;
- c) métodos para Avaliar as Fontes de um Mesmo Nutriente, subdivididos em: Método de Comparação Entre Curvas de Respostas, Métodos de Interpretação de Resultados na Comparação de Fontes de Fósforo através de Modelos Adaptados aos Dados Obtidos, e o Índice de Eficiência Agronômica (IEA).

### 2.10.1 Índice de eficiência agronômica

De acordo com PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN (2004) o índice de eficiência agronômica (IEA) é um “*método para comparar a eficiência de duas ou mais fontes de P em uma única dose de aplicação. Quando são avaliadas mais fontes de P define-se uma fonte-padrão e relaciona-se a eficiência de todas as outras a esta*”. É também conhecido como método da equivalência em relação a uma fonte-padrão ou de referência. A fórmula é assim definida:

$$IEA = \Delta Y_i / \Delta Y_n \quad \text{Equação 4}$$

sendo:

IEA = Índice de Eficiência Agronômica;

$\Delta Y_i$  = Diferença da variável dependente (produção de massa seca, P acumulado ou produtividade) entre os tratamentos com adição da fonte i de P e sem adição de P;

$\Delta Y_n$  = Diferença da variável dependente (produção de massa seca, P acumulado ou produtividade) entre os tratamentos com adição da fonte-padrão de P e sem adição de P;

CHIEN, SALE e FRIESEN (1990a) ainda sugeriram a possibilidade deste IEA ser calculado desconsiderando-se o tratamento sem adição de P. Porém, apresenta a desvantagem de que os efeitos relacionados com o local, conteúdo inicial de P disponível entre outros não sejam eliminados.

$$IEA (\%) = Y_1 / Y_2 \times 100 \quad \text{Equação 5}$$

em que:

$Y_1$  = produção obtida pela fonte que está sendo testada com a dose X de P total aplicado;

$Y_2$  = produção obtida pela fonte de referência (ST) na mesma dose X de P total aplicado.

## 2.11 EXTRATORES DE FÓSFORO

Muitos métodos têm sido empregados para diagnosticar o nível de disponibilidade de P para as plantas. Cada método apresenta peculiaridades tendo maior ou menor facilidade de extrair P.

Atualmente, as análises de rotina no Brasil são feitas empregando-se dois métodos básicos: Mehlich 1 (Mehlich, 1978, citado por MOREIRA et al., (2001)<sup>9</sup>, e resina trocadora de íons (RAIJ, 1991). O extrator de Mehlich 1, ou Carolina do Norte ou, ainda, duplo ácido, é o mais empregado. Diferentes capacidades de solubilizar P de compostos fosfatados são observadas para estes dois métodos.

O extrator de Mehlich-1 se constitui da adição de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0125 mol  $\text{l}^{-1}$  + HCl 0,05 mol  $\text{l}^{-1}$ , ácidos fortes em baixas concentrações, à uma alíquota de solo. Estes ácidos dissolvem predominantemente o P ligado ao Cálcio e quantidades menores de P ligado a Ferro e Alumínio, em função das características de solubilidade dos fosfatos (SILVA e RAIJ, 1999). O Mehlich-1 é o método de extração de P utilizado na rotina dos laboratórios de análise de solo que fazem parte da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e Tecido Vegetal dos Estados do RS e SC (ROLAS). Segundo BAHIA FILHO, BRAGA e RIBEIRO (1983) críticas têm sido dirigidas ao extrator de Mehlich-1, em função de sua capacidade de extrair P não disponível de solos que receberam fosfatos naturais, assim como de baixos teores obtidos em solos com elevados níveis de óxidos de ferro e alumínio.

Segundo SILVA e RAIJ (1999) as esferas de resina trocadora de íons utilizadas neste método formam um sistema poroso em função de um arranjo matricial das cadeias de poliestireno e, dada a presença de grupos funcionais nessas cadeias, o material comporta-se como uma base forte, estando dissociado em qualquer valor de pH. A reação é de equilíbrio, sendo que há a transferência de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  da solução de extração para a resina em função da alta capacidade de troca de íons da resina.

A resina, saturada com  $\text{NaHCO}_3$ , age muito semelhantemente à absorção de P pelas plantas pela transferência do P lábil para a solução do solo e, em seguida,

---

<sup>9</sup>MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 9, p. 477-492, 1978.

as raízes das plantas Este método baseia-se no fato de o solo ser um trocador de íons, sendo o pH da suspensão resina-solo semelhante ao pH do solo (SILVA e RAIJ, 1999).

Um Latossolo Vermelho-Amarelo, álico, foi tratado por NAKAYAMA et al., (1998) com superfosfato, termofosfato magnesiano, fosfato de Araxá e fosfato de Gafsa, onde cultivou arroz. Elevados teores de P mehlich-1 foi encontrado no solo nos tratamentos que receberam fosfato natural de Araxá, principalmente em dose mais elevada ( $150 \text{ mg dm}^{-3}$ ). Valores inferiores ao do fosfato natural de Áraxa foram obtidos pelo mesmo extrator quando se aplicou termofosfato e fosfato de Gafsa, que são rochas mais reativas no solo. Estes autores também constataram baixo índice de correlação entre extração de P pela planta e o teor no solo indicado pelo extrator de Mehlich-1, apontando-o como inadequado quando se utiliza fosfatos naturais e que, a resina trocadora de íons expressa melhores teores de P do solo, em comparação com extrator Mehlich-1, principalmente quando uma fonte fosfatada insolúvel em água é aplicada. Neste trabalho a resina forneceu as melhores correlações entre o fósforo do solo e produção de massa seca. Este fato também já era salientado por RAIJ et al., (1987).

MIRANDA et al., (2002), trabalhando com solos argilosos, verificou que o método da resina trocadora de íons extraiu mais P que o Mehlich-1. Segundo RAIJ et al., (1986) o extrator de mehlich-1 pode apresentar baixa capacidade de extração em solos argilosos. Verificou-se correlação significativa entre métodos, o que indica, embora extraindo-se quantidades diferentes de P, os extratores guardam a mesma proporção e variabilidade entre si semelha para amostras com diferentes teores de P. Em solos com menor teor de argila o método de Mehlich-1 tem sido superior ao método da resina nos trabalhos de vários autores, sendo encontradas maiores quantidades extraídas em solos com menor teor de argila. MOREIRA et al., (2002) trabalhando com os fosfatos naturais de Carolina do norte e Arad em centrossema cultivada em um Latossolo Amarelo distrófico, o extrator de Mehlich 1 apresentou maior taxa de recuperação de P dos fosfatos naturais seguido da resina. Segundo SHELTON e COLEMAN (1968)<sup>10</sup> citados por MOREIRA et al., (2002) o extrator de

---

<sup>10</sup>SHELTON, J. E.; COLEMAN, N. T. **Inorganic phosphorus fractions and their relationships to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils.** Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 91-94, 1968.

Mehlich-1 apresenta ação preferencial na dissolução de fosfatos de Ca, o que deve arrazoar este resultado em função da presença significativa desses compostos em fosfatos naturais. MUZZILI (1982) encontrou altos teores de P extraído pelo Mehlich 1 em solo tratado com fosfatos naturais, sem que ocorresse elevada eficiência de uso deste nutriente pelas culturas testadas. PAVAN e CHAVES (1996), trabalhando com Latossolo Vermelho distroférico (LVdt) muito argiloso, sob café adensado, verificaram maior eficiência do extrator Mehlich-1, quando comparado ao extrator de resina. ROSSI et al., (1999) trataram um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, de textura média com superfosfato triplo, o termofosfato Yoorin, o fosfato de Carolina do Norte e o fosfato de Arad. Os resultados indicaram que os extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons foram semelhantes na extração de P do solo. PÉREZ et al., (2003), trabalhando com de cana-de-açúcar em um solo originado de cinzas vulcânicas, com baixo teor de P e alta capacidade de adsorção do nutriente, obtiveram alta correlação entre os extratores de mehlich-1 e RTI.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO DE EXPERIMENTOS

Dois experimentos de mesmo material e métodos foram conduzidos na casa de vegetação do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA) do Setor de Ciências Agrárias (SCA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba-PR; Um primeiro experimento foi instalado num Latossolo de Arapoti-PR e um segundo experimento num Latossolo de Contenda-PR. A localização fica entre 25° 25' 48" S e 49° 16' 15" O. O clima local é do tipo Cfb, (KÖEPEN, 1948), e a altitude: 908 m.

#### 3.2 SOLOS

Para o primeiro experimento, foi utilizado um Latossolo Vermelho distrófico, típico (LVdt) (EMBRAPA, 1999) de textura média, cuja camada arável (0-20 cm) foi coletada em área sob sucessão secundária da Fazenda Mutuca, no Município de Arapoti-PR, no ponto de coordenadas geográficas S 24° 16' 04,3" e W 50° 06' 41,6". Para o segundo experimento, utilizou-se a camada arável de um Latossolo Vermelho-Amarelo, distrófico, típico (LVAdt) (EMBRAPA, 1999), de textura argilosa, coletado também em área sob sucessão secundária à beira da rodovia Araucária-Contenda, no Município de Contenda-PR, em ponto de coordenadas geográficas 25° 41' 41,2" S e 49° 33' 13,6" O.

Ambos os solos foram secos ao ar e passados em peneira de 2 mm, gerando a TFSA<sup>11</sup>. Em seguida, amostras representativas foram levadas à estufa e secas por 24 horas a 105 °C para a determinação da umidade atual (EMBRAPA, 1997) obtendo-se 6% e 7% de umidade, respectivamente, para o LVdt e LVAdt, média de três replicatas. As características originais de fertilidade dos solos (Tabela 1) foram determinadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do DSEA do SCA da

---

<sup>11</sup> TFSA: terra fina seca ao ar.

UFPR com amostras de TFSE<sup>12</sup> de ambos os solos, segundo metodologias de PAVAN et al., (1992). O P resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001), para os tratamentos com fosfato natural parcialmente acidulado alvorada, foi determinado no Laboratório de Solos e Plantas da Fundação ABC, em Castro-PR.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVdt) DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI - PR E LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO (LVAdt) DO MUNICÍPIO DE CONTENDA-PR

Solo	pH CaCl <sub>2</sub>	pH SMP	Al	H + Al	Ca + Mg	Ca	Mg	K	T	P	V	C
LVdt <sup>1</sup>	3,9	4,9	1,9	11,3	0,5	0,3	0,2	0,12	11,9	1,0	5,2	23,2
LVAdt <sup>2</sup>	3,9	4,8	2,5	12,1	1,6	1,0	0,6	0,15	13,8	1,5	12,6	31,7

<sup>1</sup> Resultados de P resina trocadora de íons (RTI) para LVdt = 4mg dm<sup>-3</sup>

<sup>2</sup> Resultados de P resina trocadora de íons (RTI) para LVAdt = 5 mg dm<sup>-3</sup>

A granulometria de solos foi determinada no Laboratório de Física do Solo do DSEA do SCA da UFPR, pelo método de Bouyoucos (EMBRAPA, 1997) e encontra-se na Tabela 2 abaixo.

### 3.3 LODO DE ESGOTO TRATADO PELO PROCESSO N-Viro

O lodo de esgoto utilizado em ambos experimentos foi gerado na Estação de Tratamento de Esgotos Belém, (ETE-Belém) da SANEPAR<sup>13</sup>, localizada no Município de São José dos Pinhais - PR, tratado pelo Processo de “*Estabilização Alcalina Avançada com Subseqüente Secagem Acelerada*” (Processo N-Viro). Deste processo obteve-se um lodo de esgoto alcalinizado (LA) denominado N-Viro Soil, que foi passado em peneira ABNT 4 mm. Sua umidade atual de 20% foi

<sup>12</sup>TFSE: terra fina seca em estufa.

<sup>13</sup>Companhia de Saneamento do Estado do Paraná.

determinada segundo EMBRAPA (1997). As características agronômicas do LA foram determinadas segundo PAVAN et al., (1992) e BRASIL (1988) constam da Tabela 3 abaixo.

TABELA 2 - GRANULOMETRIA E CAPACIDADE DE CAMPO DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVdt) DO MUNICÍPIO DE ARAPOTI-PR E LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO (LVAdt) DO MUNICÍPIO DE CONTENDA-PR

Solo	-----FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS -----				CC <sup>2</sup>
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
	-----%-----				
LVdt1	23,8	27,9	15,8	32,5	21,6
LVAdt2	6,8	11,4	19,3	62,5	29,3

<sup>1</sup>Densidade aparente = 1,030 g cm<sup>-3</sup> (EMBRAPA, 1997), assumida como 1,000 g cm<sup>-3</sup>

<sup>2</sup>Densidade aparente = 1,060 g cm<sup>-3</sup> (EMBRAPA, 1997), assumida como 1,000 g cm<sup>-3</sup>

<sup>3</sup>Capacidade de campo (EMBRAPA, 1997)

TABELA 3 - CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ORIUNDO DA ETE-BELÉM<sup>1</sup>, N-Viro Soil

PN <sup>2</sup> (ECaCO <sub>3</sub> )	PRNT <sup>3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	N	P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	S	Ca	Mg	C orgânico
%	%		-----g kg <sup>-1</sup> -----							
93,38	67,54	12,8	4,9	1,51	3,47	0,7	1,0	193,0	110,0	31,1

<sup>1</sup>ETE = estação de tratamento de esgotos

<sup>2</sup>PN = poder de neutralização

<sup>3</sup>PRNT = poder relativo de neutralização total

### 3.4 FONTES UTILIZADAS PARA ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO

As fontes de P utilizadas para adição de P em lodo de esgoto alcalinizado (LA) foram: fosfato natural parcialmente acidulado alvorada (FPA), superfosfato simples (SS), e superfosfato triplo (ST) como fonte de P referência de adição e cálculos de índice de eficiência agrônômica. Os respectivos teores totais de P e  $P_2O_5$  foram determinados segundo PAVAN et al., (1992) precedido de digestão nitroperclórica. O P solúvel em CNA + água e P solúvel em água foram determinados no Laboratório de Sólidos do Serviço Social da Indústria (SESI) em Curitiba segundo BRASIL (1988). A granulometria das três fontes de fósforo foram determinadas segundo BRASIL (1983) e encontram-se na Tabela 4 abaixo.

TABELA 4 - TEORES DE FÓSFORO E FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)

FAP <sup>1</sup>	TTP <sup>2</sup>	<sup>3</sup> TTP <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<sup>4</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> CNA + H <sub>2</sub> O	<sup>5</sup> P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> H <sub>2</sub> O	-----FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS-----						
					0,075	0,1	0,25	0,5	1	2	4
-----g kg <sup>-1</sup> -----					----- (g kg <sup>-1</sup> ) <sup>6</sup> -----						
FPA <sup>8</sup>	84,3	193,4 <sup>7</sup>	148,2	63,4	65,7	213,1	172,1	180,6	165,6	5,8	0
SS <sup>9</sup>	64,2	147,4 <sup>7</sup>	128,9	92,2	0	0	0	0,1	103,1	876,5	20,3
ST <sup>10</sup>	195,1	447,0	441,5	400,4	0	0	0	0	2,2	846,7	150,2

<sup>1</sup>FAP: fonte de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado

<sup>2</sup>TTP: teor total de fósforo na fonte, determinado pelo método do azul de molibdato precedida de digestão nitroperclórica (JONES e CASE, 1990).

<sup>3</sup>TTP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: teor total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na fonte obtido por meio de cálculo a partir do teor total de P.

<sup>4</sup>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> CNA + H<sub>2</sub>O: teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em Citrato Neutro de Amônio + Água (BRASIL, 1988).

<sup>5</sup>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> H<sub>2</sub>O: teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em água (BRASIL, 1988)

<sup>6</sup>g kg<sup>-1</sup>: fração granulométrica do fertilizante retida na malha, em g kg<sup>-1</sup>(BRASIL, 1983).

<sup>7</sup>Teores abaixo da legislação (BRASIL, 1983), provavelmente, em função de amostragem não representativa de lote de fertilizante efetuada por funcionários de empresas fornecedoras.

<sup>8</sup>FPA = fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

<sup>9</sup>SS = superfosfato simples

<sup>10</sup>ST = superfosfato triplo

### 3.5 ADIÇÃO DE FÓSFORO A LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO

Com base nos teores de  $P_2O_5$  das fontes de P foram efetuados cálculos para adição do nutriente a lodo de esgoto alcalinizado (N-Viro Soil) em níveis de 1%, 2% e 4% de  $P_2O_5$ , que foram transformados para valores respectivos de 0,436% P, 0,872% P e 1,745% P provenientes de FPA, SS e ST (Tabela 5).

TABELA 5 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO, QUANTIDADE DA FONTE DE FÓSFORO E QUANTIDADE PURA DE LODO E TOTAL DE MISTURAS DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO COM FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO, EM PERCENTAGEM

FAP <sup>2</sup>	NAP (%) <sup>1</sup>								QTM <sup>5</sup> (kg)
	0	0,436	0,872	1,745	0	0,436	0,872	1,745	
	-----QF <sup>3</sup> (kg)-----				-----QLA <sup>4</sup> (kg)-----				
FPA <sup>6</sup>	0	5,17	10,34	20,68	100	94,83	89,66	79,32	100
SS <sup>7</sup>	0	6,78	13,56	27,12	100	93,22	86,44	72,88	100
ST <sup>8</sup>	0	2,24	4,48	8,96	100	97,76	95,52	91,04	100

<sup>1</sup>NAP (%): níveis de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado, em percentagem

<sup>2</sup>FAP: fontes de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado, em percentagem

<sup>3</sup>QF: quantidade da fonte de P para suprir os níveis de adição, em percentagem

<sup>4</sup>QLA: quantidade de lodo de esgoto alcalinizado puro na mistura com quantidades de fontes de P

<sup>5</sup>QTM: quantidade total da mistura de lodo de esgoto alcalinizado adicionado de 0%, 0,436%, 0,872% e 1,745% de P

<sup>6</sup>FPA: fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

<sup>7</sup>SS: superfosfato simples

<sup>8</sup>ST: superfosfato triplo

Para o estabelecimento de tratamentos foi recomendada uma única dose-teste de 45,851 kg ha<sup>-1</sup> de P (105 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ ) a partir de cada nível de adição de P segundo CQFS-RS/SC (2004) cujos cálculos para cada fonte de P constam dos Apêndices 1, 2 e 3. Quando esta dose de P foi recomendada a partir do nível de adição de 0,436% P (1%  $P_2O_5$ ), independentemente da fonte, gerou-se uma dose máxima de 10,5 Mg ha<sup>-1</sup> de mistura. Baseado nesta dose, tomou-se 10,5 Mg ha<sup>-1</sup> de

lodo de esgoto alcalinizado puro<sup>14</sup> como testemunha específica para cada fonte de adição de P ao lodo de esgoto. Ou seja, gerou-se o nível de adição de 0% P, constituído pelos tratamentos T1, T5 e T9, respectivamente, testemunhas específicas para fosfato natural parcialmente acidulado alvorada (FPA), superfosfato simples (SS) e superfosfato triplo (ST). Obteve-se, assim, 4 níveis e 3 fontes de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado, totalizando-se 12 tratamentos com 4 repetições. A recomendação de dose única de P a partir de cada tratamento gerou como únicas causas de variação os 4 níveis e as 3 fontes de P adicionados ao lodo.

Dessa forma, os tratamentos (T) estiveram assim estabelecidos para ambos os experimentos: T1 = testemunha específica para FPA = 0% P = lodo alcalinizado puro; T2 = 0,436% P de FPA; T3 = 0,872% P de FPA; T4 = 1,745% P de FPA; T5 = testemunha específica para SS = 0% P lodo alcalinizado puro; T6 = 0,436% P de SS; T7 = 0,872% P de SS; T8 = 1,745% P de SS; T9 = testemunha específica para ST = 0% P = lodo alcalinizado puro; T10 = 0,436% P de ST; T11 = 0,872% P de ST e T12 = 1,745% P do ST;

As doses de lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P para suprir a dose-teste de 45,851 kg P ha<sup>-1</sup> (105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a partir de cada tratamento encontram-se na Tabela 6, abaixo, e foram calculadas para vasos de 3 dm<sup>3</sup> contendo 2,5 kg de solo peso seco (Tabela 7). Todas as doses de LA puro nas misturas de adição de P contêm 1,51 g kg<sup>-1</sup> de P ou 3,47 g kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Tabela 3 acima), determinado segundo PAVAN et al., (1992) precedida de digestão nítrica definida por JONES e CASE (1990).

Em seguida procedeu-se às misturas de quantidades de lodo de esgoto alcalinizado com as quantidades de fontes de P para o estabelecimento de tratamentos em Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de Contenda-PR.

---

<sup>14</sup>Esta dose foi tomada como testemunha específica para cada fonte de adição de fósforo em função do baixo pH dos solos CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>), que poderia prejudicar a produção das testemunhas.

TABELA 6 - DOSES TOTAIS, POR HECTARE, DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO, QUANTIDADES DE FONTES FÓSFORO E DOSE PURA DE LODO NAS MISTURAS PARA ESTABELECIMENTO DE TRATAMENTOS

Tratamentos	FAP <sup>1</sup>	NAP <sup>2</sup> (%)	DT <sup>3</sup>	QLA <sup>4</sup>	DF <sup>5</sup>	DP <sup>6</sup>
			------(kg ha <sup>-1</sup> )-----			
T1	FPA <sup>7</sup>	0	10500	10500	0	0
T2	FPA	0,436	10500	9957,15	542,85	45,851
T3	FPA	0,872	5250	4707,15	542,85	45,851
T4	FPA	1,745	2625	2082,15	542,85	45,851
T5	SS <sup>8</sup>	0	10500	10500	0	0
T6	SS	0,436	10500	9788,1	711,9	45,851
T7	SS	0,872	5250	4538,1	711,9	45,851
T8	SS	1,745	2625	1913,1	711,9	45,851
T9	ST <sup>9</sup>	0	10500	10500	0	0
T10	ST	0,436	10500	10264,8	235,2	45,851
T11	ST	0,872	5250	5014,8	235,2	45,851
T12	ST	1,745	2625	2389,8	235,2	45,851

<sup>1</sup>FAP: Fonte de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado

<sup>2</sup>NAP: nível de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado, em percentagem

<sup>3</sup>DT: dose total por hectare de lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P

<sup>4</sup>QLA: dose de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas de adição de P

<sup>5</sup>DF: dose da fonte de P na mistura de adição para suprir a dose-teste de 45,851 kg ha<sup>-1</sup> de P (105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

<sup>6</sup>DP: dose de P recomendada para 1 ha (2000000 kg médios de solo da camada arável, considerada a densidade de amostras de solo deformado = 1 g cm<sup>-3</sup> ou 1000 kg m<sup>-3</sup>), equivalente a 105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

<sup>7</sup>FPA: fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

<sup>8</sup>SS: superfosfato simples

<sup>9</sup>ST: superfosfato triplo

TABELA 7 - DOSES TOTAIS, POR VASO, DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO, QUANTIDADE DE FONTES FÓSFORO E DOSE PURA DE LODO NAS MISTURAS PARA ESTABELECIMENTO DE TRATAMENTOS

Tratamentos	FAP <sup>1</sup>	NAP <sup>2</sup> (%)	DT <sup>3</sup>	QLA <sup>4</sup>	QF <sup>5</sup>	DP <sup>6</sup>
			------(g vaso <sup>-1</sup> )-----			
T1	FPA <sup>7</sup>	0	13,125	13,125	0	0
T2	FPA	0,436	13,125	12,445	0,68	0,057
T3	FPA	0,872	6,563	5,883	0,68	0,057
T4	FPA	1,745	3,281	2,612	0,68	0,057
T5	SS <sup>8</sup>	0	13,125	13,125	0	0
T6	SS	0,436	13,125	12,235	0,89	0,057
T7	SS	0,872	6,563	5,673	0,89	0,057
T8	SS	1,745	3,281	2,391	0,89	0,057
T9	ST <sup>9</sup>	0	13,125	13,125	0	0
T10	ST	0,436	13,125	12,831	0,294	0,057
T11	ST	0,872	6,563	6,269	0,294	0,057
T12	ST	1,745	3,281	2,987	0,294	0,057

<sup>1</sup>FAP: fonte de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado

<sup>2</sup>NAP: nível de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado, em percentagem

<sup>3</sup>DT: dose total por vaso de lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P

<sup>4</sup>QLA: quantidade de lodo de esgoto alcalinizado puro na mistura de adição

<sup>5</sup>QF: quantidade da fonte de P na mistura de adição para suprir a dose de 45,851 kg ha<sup>-1</sup> de P (105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>)

<sup>6</sup>DP: dose de P recomendada para 1 ha<sup>-1</sup> (2000000 kg médios de solo da camada arável, considerada a densidade de amostras de solo deformado = 1 g cm<sup>-3</sup> ou 1000 kg m<sup>-3</sup>), equivalente a 105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

<sup>7</sup>FPA: fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

<sup>8</sup>SS: superfosfato simples

<sup>9</sup>ST: superfosfato triplo

### 3.6 PREPARO DE TRATAMENTOS

As misturas de LA com as fontes de fósforo referentes suprimento de 45,851 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  (105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ ) e, conseqüentemente, estabelecimento dos tratamentos, foram efetuadas no dia 11/07/2006 da seguinte forma: em copos de Becker de 250 ml foram ajustados sacos plásticos de polietileno com 12 cm de largura e 15 cm de altura. O Becker foi posto sobre balança de precisão, que foi tarada. Primeiramente foram pesadas 13,125 g de LA puro referentes às testemunhas (níveis de 0% de adição de P), ou seja, os tratamentos 1, 5 e 9, respectivamente, as testemunhas específicas para as fontes de adição FPA, SS e ST. Em seguida, foram pesadas as quantidades dos fertilizantes referentes aos níveis de 0,436%, 0,872% e 1,745% de adição de P a LA, e a balança foi tarada novamente. As quantidades de LA puro necessárias para composição de tratamentos foram pesadas adicionando-as sobre os fertilizantes já pesados até completar-se as quantidades de misturas referentes à recomendação da dose-teste (45,851 kg P  $ha^{-1}$  = 105 kg  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ ). Em seguida os sacos plásticos foram agitados homogêaneamente nos sentidos horizontal e vertical durante 10 segundos para todos os tratamentos. Em seguida os mesmos foram lacrados até o momento de serem adicionados aos solos dos respectivos experimentos.

Vinte e quatro horas após preparo, os tratamentos foram aplicados em 2,5 kg de solo peso seco contidos em sacos plásticos de 5 L, que foram lacrados e agitados homogêaneamente no sentido horizontal e vertical por 10 segundos para todos os tratamentos.

### 3.7 RANDOMIZAÇÃO DE UNIDADES EXPERIMENTAIS E ADIÇÃO DE TRATAMENTOS AO SOLO

A randomização foi feita previamente para os vasos vazios, que foram identificados, sorteados e sobrepostos em mesas de 1,20 m de largura por 3,20 m de comprimento. Os solos tratados (contidos em sacos plásticos) foram adicionados nos vasos (unidades experimentais) e regados até a capacidade de campo.

### 3.8 SEMEADURA

A semeadura foi feita 24 horas após os tratamentos, no dia 12/07/2006, com 11 sementes vaso<sup>-1</sup> da cultivar de feijão IPR Uirapuru (*Phaseolus vulgaris* L.), de hábito indeterminado, tratadas com o fungicida Thiram. Aos 12 dias após germinação procedeu-se a um desbaste, mantendo-se 6 plantas por vaso. Duas pulverizações contra oídios foram efetuadas nos dias 16/08/2006 e 28/08/2006.

### 3.9 CONDUÇÃO DE EXPERIMENTOS

#### 3.9.1 Adubação nitrogenada e potássica

As adubações nitrogenada e potássica foram recomendadas para um hectare de ambos os solos (2000000 de kg médios de solo da camada arável, considerada uma densidade de 1g cm<sup>-3</sup> de amostras deformadas de solo) segundo CQFS – RS/SC (2004), baseadas em análise química (Tabela 1) e física de solos (Tabela 2) . As recomendações foram calculadas para cada unidade experimental e constam na Tabela 8. As quantidades da fonte de N e K, na forma de KNO<sub>3</sub> foram distribuídas em cobertura no dia 13/07/2006, passados 13 dias da semeadura.

#### 3.9.2 Coleta de dados durante o ciclo da cultura

Durante todo o ciclo do feijoeiro, foram colhidos todos os pedicelos e folhas senescentes de plantas, que foram secos em estufa de circulação forçada a 65 °C até peso constante e pesados em balança de precisão para somarem-se ao material colhido posteriormente. O crescimento em altura de plantas (cm) foi medido com régua de acrílico a partir de 0,5 cm do nível do solo, completados 84 dias da semeadura, no estádio R8.

TABELA 8 - RECOMENDAÇÃO DE NITROGÊNIO (N) E POTÁSSIO (K) POR HECTARE, BASEADA NA CQFS-NRS-SBCS, (2004) E CALCULADAS PARA VASOS SUPRIDAS NA FORMA DE NITRATO DE POTÁSSIO

Solo	QRN <sup>1</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	QRN <sup>2</sup> (g vaso <sup>-1</sup> )	QRK <sup>3</sup> (kg ha <sup>-1</sup> )	QRK <sup>4</sup> (g vaso <sup>-1</sup> )
LVdt	30	0,037	60	0,075
LVAdt	30	0,037	70	0,087

**Nota:** As doses de nitrogênio foram supridas integralmente com o KNO<sub>3</sub>, as doses de potássio foram excedidas em 38,5 kg/ha para todos os tratamentos

<sup>1</sup>QRN = quantidade de N recomendado na forma de KNO<sub>3</sub> para 1ha (considere-se 1 hectare (ha) como 2000000 de kg médios de solo da camada arável (densidade considerada = 1,000 g cm<sup>-3</sup> = segundo EMBRAPA, 1997)

<sup>2</sup>QRN = quantidade de N recomendado na forma de KNO<sub>3</sub> calculada para vasos contendo 2,5 kg de solo peso seco

<sup>3</sup>QRK: quantidade de K recomendado na forma de KNO<sub>3</sub> para 1 ha (considere-se 1 hectare (ha) como 2000000 de kg médios de solo da camada arável (densidade considerada = 1,000 g cm<sup>-3</sup> =

<sup>4</sup>QRK: quantidade de K recomendado na forma de KNO<sub>3</sub> e calculada para vasos contendo 2,5 kg de solo peso seco

### 3.9.3 Colheita

A colheita foi feita cortando-se as plantas homoganeamente com tesoura de jardim, com auxílio de régua de acrílico, a uma altura de 0,5 cm do nível do solo, quando estas já se apresentavam maduras (estádio R9) e os grãos com umidade aproximada de 13%. O material colhido foi posto a secar em estufa de circulação forçada a 65 °C até peso constante, no Laboratório de Fitotecnia do Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo da UFPR.

### 3.9.4 Coleta de dados pós-colheita

#### 3.9.4.1 Altura de plantas e componentes de produção de feijoeiro

As produções de grãos e massa seca total da parte aérea (MSTPA), em  $\text{g vaso}^{-1}$ , foram obtidas pesando-se a planta inteira (talo, hastes e vagens com grãos) em balança de precisão no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo da UFPR. Os grãos foram pesados separadamente após trilhagem manual de vagens.

#### 3.9.4.2 Análises químicas de solo e tecido vegetal

Amostras representativas de solo foram coletadas de cada unidade experimental para análise das variáveis químicas pH  $\text{CaCl}_2$  ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$ ), H+ Al, Al, Ca e Mg trocáveis, carbono orgânico e P Mehlich-1 para todos os tratamentos. Os solos que receberam os tratamentos com lodo adicionado de P a partir do FPA também foi analisado pelo método da resina trocadora de íons, no Laboratório de Solos e Plantas, da Fundação ABC, em Castro-PR. Os teores de P na massa seca da parte aérea do feijoeiro (MSPA = ramos + pedicelos + folhas + talos + cascas de vagens) e nos grãos foram determinados pelo método do azul de molibdato (PAVAN et al., 1992) precedido de digestão nítrica (JONES e CASE, 1990) no LQFS do SCA da UFPR. Estes dados foram utilizados para cálculo de percentagem de P acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro. Os cálculos foram efetuados da seguinte forma:

$$\text{P acumulado (\%)} = (\text{teor de P na MSTPA, em \%}) \times \text{MSTPA, em g vaso}^{-1}.$$

### 3.10 ESTATÍSTICA E AJUSTE DE CURVAS DE TENDÊNCIA

Ambos os experimentos foram conduzidos em delineamento experimental inteiramente casualizado em arranjo fatorial 4 por 3, respectivamente, quatro níveis e 3 fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado, totalizando-se 12 tratamentos com 4 repetições. Ainda, para se comparar o P no solo após experimentos, tomou-se os tratamentos (níveis de adição de P) a partir do fosfato natural parcialmente acidulado (FPA) que, analisados pelos extratores Mehlich-1 e resina trocadora de íons, constitui-se mais um estudo inserido em cada experimento. Ou seja, 4 níveis de adição de P a partir do FPA vs. 2 extratores, totalizando-se 8 tratamentos com 4 repetições. A homogeneidade de variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett e as comparações de médias foram feitas por meio do teste de Tukey, a 95% de probabilidade, no software MSTAC (Michigan State University). Ajustes de curvas de tendência foram gerados a fim de se constatar correlações entre tratamentos e variáveis mensuradas.

### 3.11 ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA

Os índices de eficiência agronômica (IEA) foram gerados com os dados de produção de MSTPA em função dos melhores tratamentos a partir de FPA e, ou SS, tomando-se como referência os mesmos níveis de adição (0,436%, 0,872% e, ou 1,745% P) com P proveniente de ST.

Para os cálculos dos IEA adaptou-se a metodologia sugerida por CHIEN, SALE e FRIESEN (1990a), representada pela seguinte fórmula:

$$IEA (\%) = Y_{n\%} / Y_2 \times 100$$

Equação 6

em que:

IEA: índice de eficiência agronômica, em %;

$n\%$ : níveis de 0,436% ou 0,872% ou 1,745% de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de FP, SS e ST;

$Y_{n\%}$ : Produção de massa seca total de feijoeiro (MSTPA) obtida com os tratamentos referentes aos níveis de adição de 0,436%, ou 0,872% ou 1,745% de P das fontes de adição testadas (FPA e SS);

Y2: média de produção de massa seca total de feijoeiro (MSTPA) obtida com os tratamentos 0,436%, ou 0,872% ou 1,745% de P da fonte ST (fonte de referência).

Com base na fórmula acima, cálculos de IEA foram efetuados utilizando-se os melhores resultados de produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro:

a) em experimento com Latossolo Vermelho distrófico, para:

a.1) o nível 0,436% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de FPA, tendo-se como referência o nível de 0,436% de adição de P de ST;

a.2) o nível 0,872% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de FPA, tendo-se como referência o nível de 0,872% de adição de P de ST;

a.3) o nível 1,745% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de FPA, tendo-se como referência o nível de 1,745% de adição de P de ST;

a.4) o nível 0,436% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 0,436% de adição de P de ST;

a.5) o nível 0,872% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 0,872% de adição de P de ST;

a.6) o nível 1,745% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 1,745% de adição de P de ST;

b) em experimento com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, para:

b.1) o nível 0,436% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 0,436% de adição de P de ST;

b.2) o nível 0,872% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 0,872% de adição de P de ST e;

b.3) o nível 1,745% de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS, tendo-se como referência o nível de 0,872% de adição de P de ST.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DE ARAPOTI-PR

#### 4.1.1 Dados químicos de Latossolo Vermelho distrófico e fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro

As análises de variância de variáveis químicas de Latossolo Vermelho distrófico e P acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro após experimento encontram-se no Apêndice 4. O pH  $\text{CaCl}_2$ , Al trocável, acidez potencial, Ca e Mg trocáveis, carbono orgânico, P extraível Mehlich-1 e percentagem de P acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro mostraram homogeneidade de variâncias e não foram requeridas transformações de dados.

A tabela de análise de variância e comparação de médias de estudo comparativo de P extraível Mehlich-1 e resina trocadora de íons a partir de tratamentos com fosfato natural parcialmente acidulado alvorada também encontram-se, respectivamente, nos Apêndices 11 e 12. Foi verificada homogeneidade de variâncias e não foram requeridas transformações de dados.

##### 4.1.1.1 Índice de pH $\text{CaCl}_2$ de Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto Alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para pH  $\text{CaCl}_2$  de Latossolo Vermelho distrófico (Apêndice 4). No entanto, os fatores isolados mostraram-se estatisticamente significativos ( $F_{<0,01}$ ). O fato indica que estes fatores são independentes entre si e existe, pelo menos, um melhor nível e uma melhor fonte de adição para esta variável.

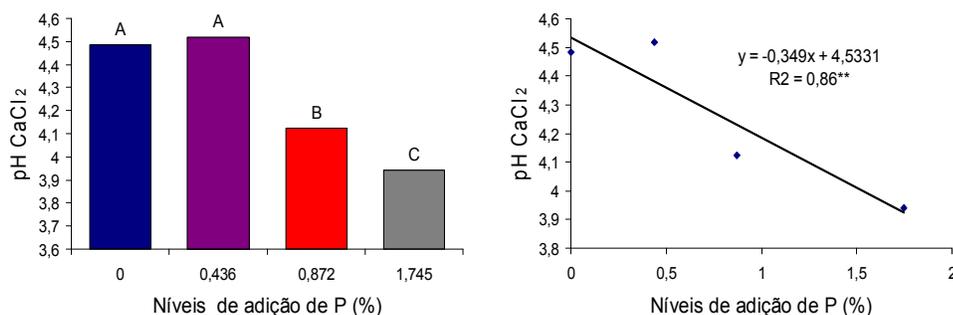
A comparação das médias de pH  $\text{CaCl}_2$  para níveis e fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado (Figura 3A.1 e Apêndice 5) indica que os tratamentos referentes aos menores níveis de adição de P (0% P = testemunhas e 0,436% P)

foram estatisticamente superiores para esta variável, observando-se aumento linear superior a 0,5 unidade (Figura 3A.2) em relação ao pH original deste latossolo (Tabela 1), mostrando-se, assim, mais eficientes na redução da acidez deste solo. Quando os níveis de adição de P aumentaram (0,872% e 1,745% P), as quantidades de lodo puro nestes tratamentos diminuíram. Consequentemente, menores valores de pH foram observados. O fato indica que o pH aumenta com a diminuição dos níveis de adição de P e consequente aumento de quantidades de lodo puro nas misturas (Tabela 7). Estas doses puras de lodo de esgoto são equivalentes a 10500 kg ha<sup>-1</sup> (10,5 Mg ha<sup>-1</sup>) e 9957,15 (9,957 Mg ha<sup>-1</sup>) a 10264,8 kg ha<sup>-1</sup> (10,264 Mg ha<sup>-1</sup>), respectivamente. Em relação ao aspecto prático desse incremento de pH do solo é que, na literatura geral, um aumento de pH CaCl<sub>2</sub> deve gerar melhores condições de solo para crescimento de plantas. Deve ocasionar, também, menor fixação de P e, consequentemente, maior disponibilidade do nutriente no solo. CLAPP et al., (1986) salientaram que, alterações no pH do solo dependem de sua textura, capacidade tamponante e do tipo de tratamento que o lodo recebeu. O pH, Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e H + Al estão relacionados com a acidez do solo. O Al<sup>3+</sup> e acidez potencial relacionam-se negativamente com as demais variáveis, o que indica que um aumento de pH proporciona a diminuição de seus valores, enquanto os valores de cálcio trocável aumentam.

Trabalhos recentes salientam a eficiência de lodo de esgoto alcalinizado em aumentar o pH do solo (MELO e MARQUES, 2000; OLIVEIRA et al., 2002), o que ocorre basicamente em função da reação alcalina dos materiais utilizados no seu tratamento (cal virgem (CaO) ou cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>).

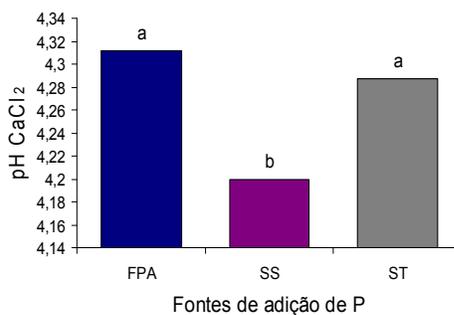
Os resultados ora obtidos reforçam a idéia de que o tipo de tratamento que este biossólido recebeu determinará a maior ou menor capacidade de alteração do pH do solo (CLAPP et al., 1986 citados por OLIVEIRA et al., 2002)<sup>1</sup>.

FIGURA 3 - (A.1) pH CaCl<sub>2</sub> DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO E FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE pH CaCl<sub>2</sub> FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO; (A.3) pH CaCl<sub>2</sub> EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO



(A.1)

(A.2)



(A.3)

FPA = fosfato natural parcialmente acidulado alvorada  
 SS = superfosfato simples  
 ST = superfosfato triplo

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ )

A pior fonte de adição de P foi o SS, a despeito da pequena diferença de valores de pH CaCl<sub>2</sub> observados (Figura 3A.3 acima) quando o lodo foi adicionado com P de FPA e ST, que se mostraram-se estatisticamente superiores e iguais entre si. A literatura indica que, dependendo da fonte de adição, estas também podem

exercer ou não influência sobre o pH do solo (VIEIRA et al., 2005; BELTRÁN et al., 1998; OSZTOICS., et al., 2005; SLOAN e BASTA, 1995), sendo os fosfatos naturais mais eficientes em função de sua reação no solo e a presença de carbonatos nas rochas mais reativas, tais como o fosfato natural parcialmente acidulado aqui utilizado cuja parte não acidulada é a fosforita alvorada, uma rocha de alta reatividade no solo.

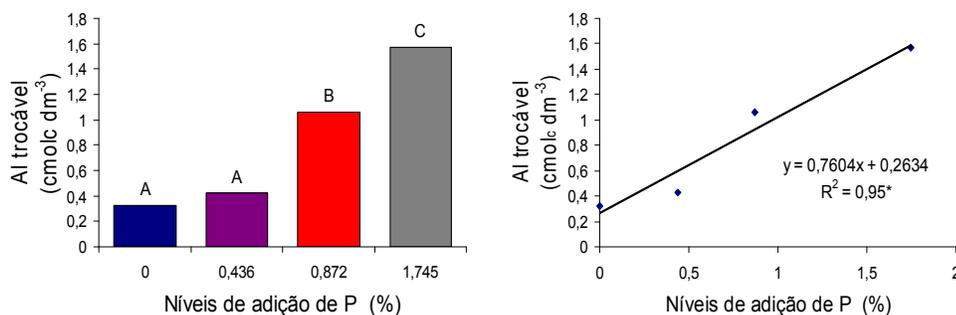
Foram observados efeitos do pH extremo deste Latossolo Vermelho distrófico (Tabela 1) sobre o feijoeiro. Os sintomas de deficiência micronutrientes daí advindos mostraram-se menos acentuados nas testemunhas, constituídas de lodo de esgoto alcalinizado puro. Além de deficiência inicial de fósforo, também ocorreram sintomas relacionados com Ca, Mg, Mo, Cu e Zn, além da nítida toxicidade de Al e Mn sobre as plantas de feijoeiro. O teor de  $Al^{3+}$  trocável original deste Latossolo, a exemplo do latossolo de Contenda-PR, pode ser considerada alta (Tabela 1). Isso foi observado em algumas plantas e, no decorrer do ciclo da cultura, desapareceram em todos os tratamentos. O fato ocorreu, provavelmente, pela presença de macro e micronutrientes presentes, tanto no lodo de esgoto alcalinizado puro (LOGAN e HARRISON, 1995 e Tabela 3) quanto nas fontes de adição de P (MALAVOLTA, 1994).

#### 4.1.1.2 Alumínio trocável em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi estatisticamente significativa para o Al trocável em Latossolo Vermelho distrófico (Apêndice 4), o que indica que são independentes entre si. No entanto os fatores nível e fonte isolados mostraram-se significativos ( $F_{<0,01}$ ) e, assim, existe pelo menos, um nível e uma fonte de adição melhores para esta variável.

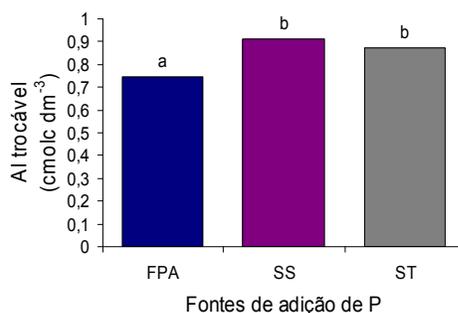
Todos os tratamentos reduziram as concentrações de Al trocável no solo. Todavia, a comparação de médias indicou que a testemunha (0% P) e os níveis de 0,436% P (Figura 4A.1 e Apêndice 6) mostraram os menores valores de Al trocável, exercendo maior influência sobre o teor trocável do elemento no solo e um aumento linear (Figura 4A.2) foi observado em função do aumento de níveis de adição e consequente redução de quantidade puras de lodo de esgoto alcalinizado (Tabela 7).

FIGURA 4 - (A.1) ALUMÍNIO TROCÁVEL DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; (A.3) ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO



(A.1)

(A.2)



(A.3)

FPA = fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

SS = superfosfato simples

ST = superfosfato triplo

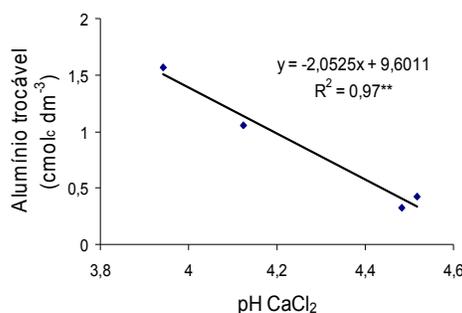
**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ )

Note-se que o efeito destes tratamentos é indicado pela superioridade estatística numérica dos tratamentos referentes aos menores níveis de adição de P (0% e 1,745% P) que, portanto, mostraram-se mais eficientes na redução do  $Al^{3+}$

trocável neste solo. As maiores reduções de Al trocável no solo foram observadas com o FPA (Figura 4A.3), mais reativo no solo em relação às outras fontes de adição, além da presença de carbonatos que, exercendo influência sobre o pH do solo, deve ter reduzido também os valores desta variável.

A Figura 5 indica a ocorrência de redução linear nos teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável no solo em função do aumento do pH do solo, o que denota associação entre aumento de pH e diminuição de Al trocável no solo. Dessa forma, os aumentos nos valores de pH  $\text{CaCl}_2$  e conseqüente diminuição da acidez do solo, devem estar associados à diminuição nos teores de  $\text{Al}^{3+}$  trocável no solo.

FIGURA 5 - CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH  $\text{CaCl}_2$  DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO



Resultados como este foram obtidos por SLOAN e BASTA (1995) que verificaram diminuição linear e altamente significativa do elemento nesta forma no solo em função de doses crescentes de N-Viro Soil e lodo caleado em três solos ácidos (pH acima de 4,0) de texturas arenosa e média. A taxas de aplicação semelhantes às praticadas neste experimento, e a pH próximo de 5,0 as concentrações eram negligíveis, o que também ocorreu no presente experimento. Estes autores observaram ainda que, em menor extensão, um lodo de esgoto não tratado alcalinamente também reduziu a presença de Al no solo. FIA, MATOS e AGUIRRE (2005) obtiveram resultados semelhantes quando da aplicação de doses 0; 33,6; 67,4; 101,0; 134,7 e 168,4  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto alcalinizado aplicadas num Latossolo Vermelho Amarelo distroférico ácido. Estes autores atribuíram o fato

à precipitação na forma de hidróxidos, reduzindo-se, assim, sua fitotoxicidade. Resultados contrários foram obtidos por VENÂNCIO GOMES et al., (2005) para a camada superficial do solo, e aumentos do Al trocável foram observados em função da aplicação das doses crescentes de lodo de esgoto não tratado alcalinamente e com pH alto. Valores maiores desta forma de Al ocorreram com os tratamentos referentes ao maior nível de adição de P (1,745% P), que contém menores doses puras de lodo alcalinizado nas misturas, o que denota seu menor efeito sobre os teores do elemento no solo. A diminuição a partir destes tratamentos também pode ser devida a contribuição da precipitação do Al trocável com P do fertilizante.

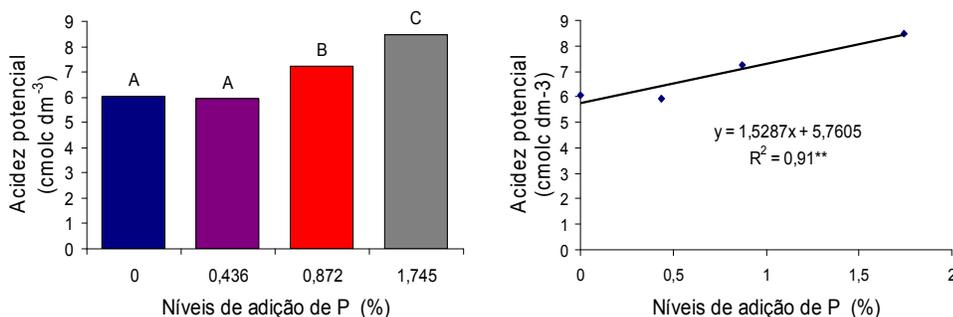
Todas as fontes reduziram sensivelmente o teor de Al trocável no solo (Figura 4A3 acima). Fato este que, corrobora com a idéia da precipitação deste elemento na solução do solo com o P dos fertilizantes, além das pequenas quantidades de P liberadas a partir do lodo puro presente nas misturas. Dentre as fontes, o FPA foi mais eficiente na redução do Al trocável neste Latossolo em relação aos tratamentos com SS e ST, que proporcionaram maiores teores desta forma do elemento no solo. Quanto ao SS, deveria ter exercido efeito semelhante ao FPA uma vez que possui em sua composição elevada concentração de sulfato de Ca (cerca de 40%). De acordo com PITTA et al., (2007) o sulfato de Ca é empregado quando se exige a diminuição de concentrações tóxicas do Al trocável no solo, pois, reduz sua atividade na solução do solo. A dissolução do sulfato de Ca aumenta a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  livre na solução do solo, que irá deslocar o  $\text{Al}^{3+}$  para a solução que, por sua vez, reagirá com o ânion sulfato, menos tóxico às plantas (CFSEMG, 1999). Entretanto, quando da rápida dissolução do SS no solo (NOVAIS e SMITH, 1999) o gesso deve ter percolado rapidamente até o fundo dos vasos, o que deve ter dificultado sua reação com o elemento na solução do solo. Quanto ao ST, de granulometria mais grosseira (Tabela 4) sua contribuição na redução do teor de Al trocável no solo pode-se dever unicamente à precipitação com o elemento da solução do solo.

#### 4.1.1.3 Acidez potencial em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para acidez potencial em Latossolo Vermelho distrófico. Porém, os fatores nível ( $F_{<0,01}$ ) e fonte ( $F_{<0,05}$ ) mostraram-se isoladamente significativos (Apêndice 4). Este fato indica que tais fatores são independentes entre si e existe, pelo menos, um melhor nível e uma melhor fonte de adição para esta variável.

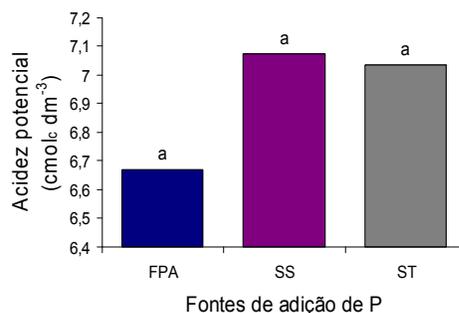
Todos os tratamentos reduziram a acidez potencial do solo. A comparação de médias de acidez potencial para níveis de adição de P denota que menores valores de acidez potencial foram obtidos a partir das testemunhas (0% P) e níveis de 0,436% de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado (Figura 6A.1 e Apêndice 7). A acidez potencial aumentou concomitantemente ao aumento de níveis de adição de P. A superioridade estatística dos menores níveis de adição em relação aos valores de acidez potencial mostra que exerceram maior efeito sobre esta variável, cujos valores foram reduzidos lineamente em cerca de  $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  em função da diminuição de níveis de adição de P neste Latossolo (Figura 6A.2). Este fato pode-se dever às maiores quantidades puras de lodo de esgoto alcalinizado na misturas de adição. Ao contrário disso, a acidez potencial manteve-se em valores pouco baixo, porém, muito próximos da acidez potencial original do solo (Tabela 1) nos tratamentos referentes aos maiores níveis de adição de P, que continham menores doses puras de lodo. Este resultado era esperado e pode estar ratificando o efeito predominante de doses puras de lodo alcalinizado sobre a acidez potencial dada a sua reação alcalina e alto poder de neutralização de acidez do solo (LOGAN e HARRISON, 1995) e, como consequência, a redução do  $\text{Al}^{3+}$  trocável e acidez potencial do solo.

FIGURA 6 - (A.1) ACIDEZ POTENCIAL DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; (A.3) ACIDEZ POTENCIAL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO FÓSFORO



(A.1)

(A.2)



(A.3)

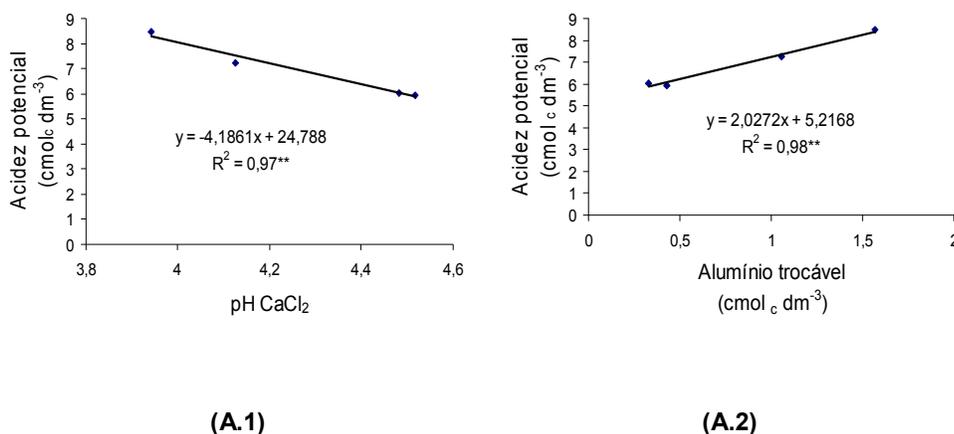
FPA = fosfato natural parcialmente acidulado alvorada  
 SS = superfosfato simples  
 ST = superfosfato triplo

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ )

GUEDES et al., (2006) trabalharam com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média, que, de maneira geral, quando se recebeu lodo de esgoto os valores de H + Al decresceram (de 3,4 foi reduzida para 2,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para uma dose de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo), correlacionando-se negativamente com pH CaCl<sub>2</sub>, resultado que atribuíram à alcalinidade intrínseca do material (pH médio > 10)

(OLIVEIRA et al., 2002). Inúmeros trabalhos que se utilizaram das mais variadas taxas de aplicação de lodos de esgoto alcalinizados no solo, ratificaram os efeitos desse biossólido sobre o pH do solo, aumentando-o e, conseqüentemente, diminuindo a acidez potencial (SLOAN e BASTA (1995); SILVA et al., (1998); CHRISTIE et al., 2001). Salientando o que CLAPP et al., 1986<sup>15</sup> citados por OLIVEIRA et al., (2002)<sup>1</sup> verificaram, houve estreita correlação negativa entre acidez potencial e pH do solo (Figura 7A.1) neste Latossolo, e um aumento do pH a acidez potencial é diminuída proporcionalmente. Também ocorreu correlação positiva entre acidez potencial e Al<sup>3+</sup> trocável no solo (Figura 7A.2), indicando que uma diminuição do Al<sup>3+</sup> ocasiona diminuição concomitante da acidez potencial do solo.

FIGURA 7 - (A.1) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub>; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE ALUMÍNIO TROCÁVEL



Resultados contrários aos aqui observados e os que se averigua na literatura foram verificados por VENÂNCIO GOMES et al., (2005) que aplicaram taxas crescentes de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo não tratado alcalinamente num Argissolo Amarelo, observando-se diminuição no pH e conseqüente aumento nos teores de Al trocável e aumento na acidez potencial do solo. A despeito da contrariedade de resultados em relação à literatura, estes autores mostraram que aumentos nos teores de Al e H+Al estavam relacionados

<sup>16</sup> CLAPP, C. E., STARK, S. A., CLAY, D. E., LARSON, W. E., **Sewage sludge organic matter and soil properties**. In: CHEN, Y. e AVNIMELECH, Y., eds. The role of organic matter in modern agriculture. Dordrecht, Martinus nijhoff, 1986. p. 209-253.

com a diminuição do pH do solo, fato que também foi evidenciado por correlações inversas altamente significativas entre os valores destes parâmetros de solo.

As fontes de P mostraram estatisticamente iguais entre si para esta variável de solo. Assim como no experimento em Latossolo Vermelho distrófico de Contenda-PR, podem ter exercido influência, ainda que exígua, sobre este variável de solo (Figura 6A.3 acima). A literatura em geral aponta para um maior efeito de rochas fosfáticas reativas sobre o pH do solo, o que reflete no seu teor de  $Al^{3+}$  trocável e, conseqüentemente, sobre a acidez potencial do solo. O SS pode ter exercido maior efeito sobre o  $Al^{3+}$  trocável do solo e acidez potencial em função da presença de grandes quantidades de sulfato de Ca na sua composição, o que reduz a atividade do elemento no solo e conseqüentemente dos valores de acidez potencial. PITTA et al., (2007) salienta que o gesso é empregado quando se exige a diminuição de concentrações tóxicas do alumínio trocável no solo. Essa redução pode estar relacionada à redução da acidez potencial, pois, a dissolução do sulfato de cálcio torna o  $Ca^{2+}$  livre na solução do solo, que irá deslocar o  $Al^{3+}$  para a solução que, por sua vez, reagirá com o ânion sulfato, menos tóxico às plantas (CFSEMG, 1999).

#### 4.1.1.4 Cálcio trocável em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

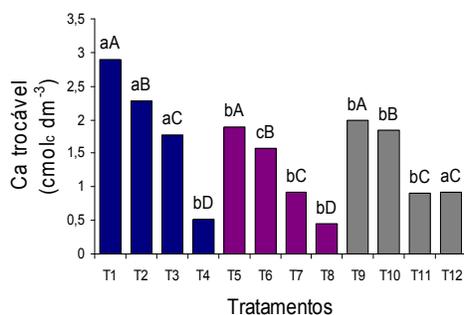
A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado mostrou-se estatisticamente significativa ( $F_{<0,01}$ ) para o Ca trocável no solo (Apêndice 4). Isso indica que estes fatores são dependentes entre si e, para chegar-se ao melhor nível de adição dever-se-á observar a fonte de fósforo utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível de adição mais adequado que outro para esta variável.

A comparação de médias de Ca trocável no solo (Figura 8A.1 e Apêndice 8) indica que todos os tratamentos aumentaram os teores trocáveis deste nutriente em relação ao teor original neste Latossolo (Tabela 1). Fato este que ocorreu, provavelmente, devido a grande percentagem de Ca presente nas fontes de P (CQFS – SC/RS, 2004; NOVAIS e SMITH, 1999) e no lodo (Tabela 3 e LOGAN e

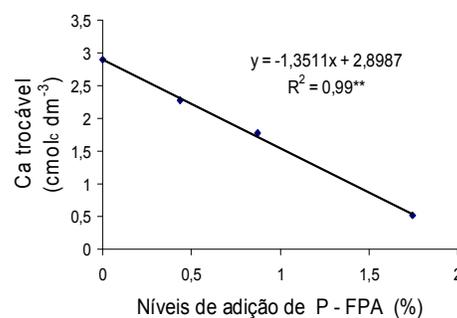
HARRISON, 1995). Como se pode observar da Figuras 8A.2 8A.3 e 8A.4, houve significativa correlação, para todas as fontes de P, entre o aumento de níveis de adição de P e redução de teores de Ca trocável no solo, o que pode dever-se à diminuição da quantidade de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas de adição (Tabela 3).

Os maiores aumentos da forma trocável de Ca no solo foram obtidos, de maneira geral, com as testemunhas (0% P) seguida pelos tratamentos referentes aos níveis de adição 0,436% P. Aumento no teor de Ca trocável no solo, motivado pelo Ca contido no lodo e no superfosfato triplo, também foi observado por SILVA, BOARETTO e BERTON (2001), que aplicaram doses de 0, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. STEHOUWER e MACNEAL (2004) verificaram que um solo Argiloso americano (EUA) tratado com 9, 18 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado e suplemento de fertilizantes inorgânicos adicionados aos tratamentos aumentou os teores de Ca no solo concomitantemente ao aumento de doses de lodo de esgoto. Estudando um Latossolo Vermelho eutrófico, BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002b) concluíram que, dentre os parâmetros de solo afetados pela adição de 36 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado, estava o Ca trocável cujo teor aumentou em função de doses aplicadas. De acordo com uma análise de componentes principais de fertilidade do solo e a partir de procedimento de rotação pela máxima variância, GUEDES et al., (2006) verificaram o efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto caleado sobre os componentes acidez do solo (Ca<sup>2+</sup>, o Al<sup>3+</sup> e pH). Mostraram que houve influência significativa somente a partir da dose de 40 Mg ha<sup>-1</sup>, exceto nesta dose aplicada superficialmente, verificada não diferente das menores doses (10 e 20 Mg ha<sup>-1</sup>) e do tratamento-controle e adubação mineral. Quando estes mesmos

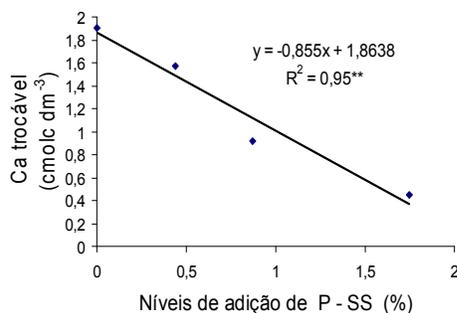
FIGURA 8 - (A.1) CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



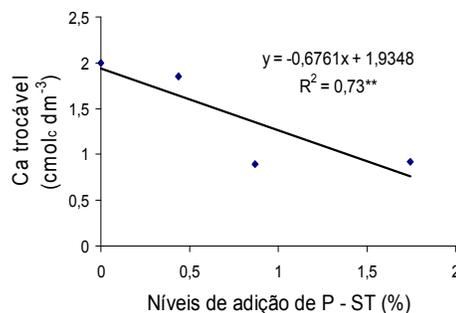
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

**Nota:** T1 a T4 = níveis de adição de fósforo a partir de FPA  
 T5 a T8 = níveis de adição de fósforo a partir de SS  
 T9 a T12 = níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de fósforo a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

autores analisaram um segundo componente, que inclui o  $\text{Ca}^{2+}$ , P, C,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB e CTC do solo, essas variáveis apresentaram comportamento em conformidade com os tratamentos aplicados e encontraram alta correlação entre o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo e a soma de bases, indicando que este parâmetro de solo é, praticamente, determinado pelo  $\text{Ca}^{2+}$ . Neste mesmo trabalho ficou indicado que “o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentou com as doses de lodo de esgoto calcado até a aplicação de  $80 \text{ Mg ha}^{-1}$ , não havendo diferenças significativas entre tratamentos numa dose referência de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  nem entre doses de 80 e  $160 \text{ Mg ha}^{-1}$ ”. Segundo os autores, “ao se considerar o elevado teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no lodo de esgoto calcado, a partir de  $80 \text{ Mg ha}^{-1}$  pode ter ocorrido uma saturação do complexo de troca por esse elemento”. Resultados contrários foram verificados por VENÂNCIO GOMES et al., (2005) quando aplicaram 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e  $60,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto num Argissolo amarelo, mesmo com cerca de 2,2% de Ca total na massa seca do biossólido.

#### 4.1.1.5 Magnésio trocável em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa ( $F_{<0,01}$ ) para o Mg trocável neste Latossolo (Apêndice 4), sendo, portanto, dependentes entre si. Assim, para se obter o melhor nível de adição de P dever-se-á observar a fonte de P utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado que outros para esta variável.

A comparação de médias de Mg trocável neste latossolo (Figura 9A.1 e Apêndice 9) indica que todos os tratamentos aumentaram os teores trocáveis deste nutriente no solo (Tabela 1). Semelhantemente ao observado para o  $\text{Ca}^{2+}$  trocável os menores níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado (0% P = testemunhas e 0,436% P), independentemente da fonte, foram mais eficientes em suprir o solo com o nutriente, mostrando os maiores aumentos nos teores de Mg trocável em relação ao teor original no solo (Tabela 1), Este fato pode ser explicado pela presença de quantidades maiores lodo alcalinizado puro nas misturas de adição

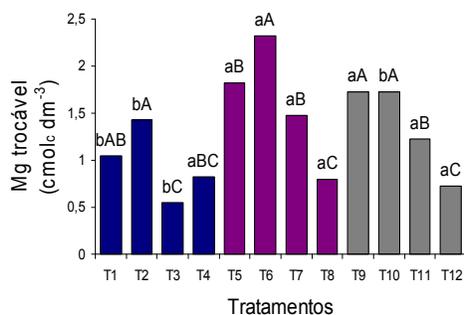
(Tabela 7) que, por sua vez, possui grande porcentagem de Mg total em sua composição (Tabela 3).

As Figuras 9A.2, 9A.3 e 9A.4 denotam as correlações existentes entre teor trocável de Mg no solo e níveis de adição de P a partir de FPA, SS e ST, respectivamente. Os melhores tratamentos foram referentes aos níveis de 0,436% P a partir do SS e a testemunha para o ST, que se mostraram estatisticamente superiores aos demais. Esta superioridade do SS com fonte de adição não está coerente, pois, o Mg provém somente do lodo presente nas misturas de adição, uma vez que estas fontes possuem pequena (0,2%) ou nenhuma quantidade do nutriente em sua constituição química original (SBCS-NRS, 2004; NOVAIS e SMITH, 1999). Dessa forma, os menores níveis de adição (0% e 0,436% P), que contêm maior quantidade de lodo de esgoto puro nas misturas de adição deveriam mostrar resultados estatisticamente iguais.

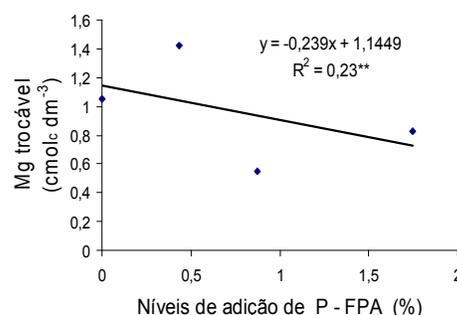
#### 4.1.1.6 Carbono orgânico em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado, assim como estes fatores isolados não foram estatisticamente significativos para o carbono orgânico neste Latossolo. O que pode ter ocorrido em função de não variação de teor de carbono com a aplicação de lodo de esgoto alcalinizado, que possuía baixo conteúdo de carbono total (Tabela 3). Os valores de carbono orgânico estiveram abaixo, porém, muito semelhantes aos encontrados originalmente neste Latossolo (Tabela 1) para todos os tratamentos. Os menores níveis de adição de P a partir do FPA e ST, que possuíam as maiores doses de lodo alcalinizado nas misturas, mostraram os maiores valores de carbono no solo (Figura 10 abaixo). Pequenos decréscimos nos teores de carbono podem dever-se à já bem estabelecida baixa precisão do método analítico utilizado (Walkley e Black).

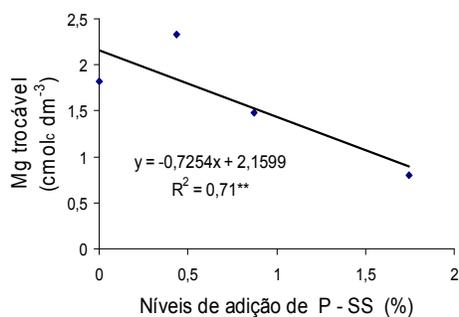
FIGURA 9 - (A.1) MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FÓSFORO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLÓ (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NO SOLO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



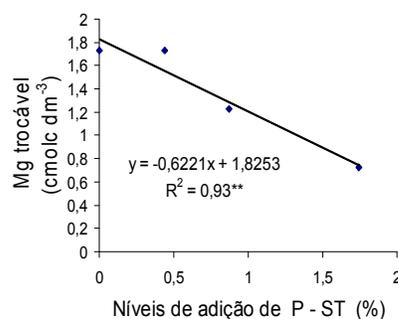
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

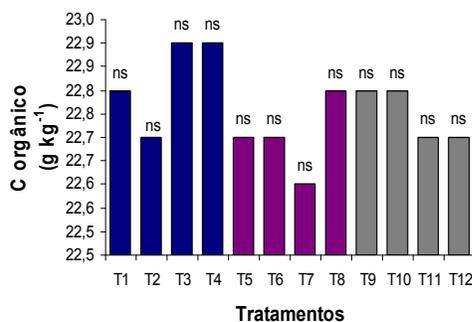
T1 a T4 = níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de fósforo a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

FIGURA 10 - CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)



T1 a T4 = níveis de adição de fósforo a partir de FPA  
 T5 a T8 = níveis de adição de fósforo a partir de SS  
 T9 a T12 = níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** ns = não significativo (Tukey  $P > 0,05$ ).

#### 4.1.1.7 Fósforo extraível Mehlich-1 em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa ( $F_{<0,01}$ ) para o P extraível Mehlich-1 em Latossolo Vermelho distrófico, o que denota dependência entre fatores (Apêndice 4). Assim, para se obter o melhor nível de adição deve-se observar a fonte de fósforo utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado que outros para esta variável de solo.

À semelhança do ocorrido no experimento com o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, argiloso, de Contenda-PR, todos os tratamentos proporcionaram aumentos de P extraível Mehlich-1 neste Latossolo após cultivo de feijoeiro, inclusive as testemunhas específicas.

A comparação de médias de P no solo indica que o nível de 0,436% (9,6 mg dm<sup>-3</sup>) a partir de SS foi estatisticamente superior para o P Mehlich-1 neste Latossolo

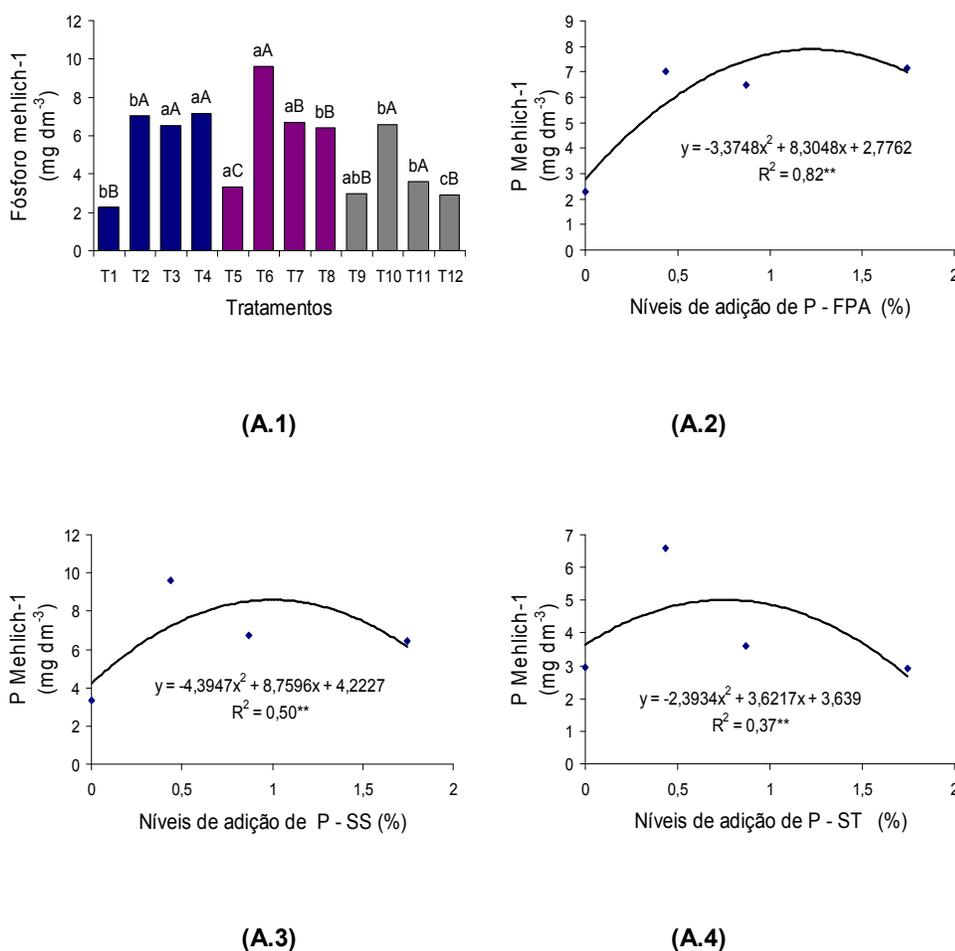
(Figura 11A.1 e Apêndice 10) em relação às duas outras fontes de adição e às testemunhas específicas (0% P). Para o FPA os melhores tratamentos foram os referentes aos níveis de 0,872% e 1,745% P. Novamente, o superfosfato triplo mostrou-se inferior estatisticamente, o que, provavelmente, ocorreu em função da granulometria desta fonte que, quando do preparo de tratamentos referentes ao nível de 0,436% P, teve maior contato das partículas do fertilizante com o lodo alcalinizado, resultando em maior formação de P ligado a Ca. Os aumentos de P extraível neste solo pode se dever à liberação do P orgânico presente no lodo (Tabela 3). Boas correlações quadráticas foram obtidas entre P extraível Mehlich-1 vs. níveis de adição de P a partir de FPA e SS, o que não ocorreu para o P Mehlich-1 vs. níveis de adição a partir de ST (Figuras 11A.2, 11A.2, 11A.3 e 11A.4).

Os resultados do presente experimento, possivelmente, devem-se também:

a) às maiores quantidades de lodo puro na mistura do nível 0,436% P de SS, cuja mineralização de parte do pequeno teor total de P orgânico (Tabela 3), provavelmente, cooperaram com estes aumentos de P extraível Mehlich-1 no solo em comparação às testemunhas e ao teor original (Tabela 1). Quanto a essa liberação de P do biossólido, MAZZARINO et al., (1998) salientaram que processo depende, primeiramente, do tipo de solo e, em segundo lugar, da origem do composto. Cerca de 50% deste P orgânico estará disponível às plantas já no primeiro ano de aplicação (SANEPAR, 1997). Quanto ao P nativo, segundo SHARPLEY (1985) o P orgânico constitui de 20-80% do total de P de solos minerais e contribui significativamente para a nutrição das plantas;

b) ao teor de P solúvel da fonte SS (Tabela 4) e sua granulometria granulada favorável à abrangência de maior volume maior de solo quando incorporado, tornando o P mais acessível às plantas. Este Latossolo de Arapoti-PR possui menor teor de argila e, conseqüentemente, de óxidos de Fe, Al (Tabela 2), o que lhe confere menor capacidade de adsorção de P em relação ao latossolo de Contenda-PR. Segundo CQFS - SC/RS (2004) esta fonte de P apresenta, no mínimo, 16% de P solúvel em água. Sua forma granulada permite menos contato com o solo e, conseqüentemente, menor fixação de P no solo. Essa granulometria também é mais

FIGURA 11 - **(A.1)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



T1 a T4 = níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de fósforo em lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey P>0,05).

favorável à maior dispersão do fertilizante no volume de solo, o que pode tornar o P mais acessível à amostragem do solo para fins de análise. BARROW (1985) salienta que a adsorção de P no solo ocorre lentamente mas, também, é responsável pela diminuição da disponibilidade do nutriente num solo recém-fertilizado”. Também, em baixo pH (< 4,5-5,0), adições de P ao solo pode resultar em precipitação de fosfatos de Al e Fe (HAYNES, 1984);

c) às quantidades médias de lodo puro no tratamento relativo ao nível de adição de 0,872% P a partir de FPA (cerca de metade do lodo puro contido no nível de 0,436% P). Entretanto, uma provável liberação do P orgânico do lodo aliada às quantidades significativas de P solúvel na fonte de adição, devem ter elevado o teor extraível de P neste solo a partir deste tratamento;

d) ao teor de P solúvel do FPA (Tabela 4) e à granulometria farelada (Tabela 2) que, sob condições ácidas deste latossolo (Tabela 1) tem a parte não acidulada desta fonte dissolvida e, conseqüentemente, liberada para a solução do solo;

e) a provável menor formação de P ligado a Ca nos tratamentos relativos aos maiores níveis de adição de P, que possuem menores quantidades de lodo alcalinizado nas misturas. Adicionalmente, o fato pode ter ocorrido em função do médio teor de argila (e óxidos e hidróxidos de Fe e Al) e, conseqüentemente, menos propício à adsorção de P neste Latossolo em relação a solos mais argilosos;

Os menores níveis de adição deveriam exercer efeito contrário sobre a disponibilidade de P no solo por possuir dose maior de lodo de esgoto de alcalinizado puro e cálcio nas misturas de adição. Os materiais alcalinos utilizados para o tratamento deste biossólido, segundo literatura já consistente, deveria precipitar o P oriundo das fontes mais solúveis de adição, como o SS. Devido ao teor de cálcio, um constituinte majoritário de lodo tratado por processo alcalino (N-Viro), menores concentrações de Fósforo extraível deveria ser encontrado para os menores níveis de adição (0,436% P). No entanto, mesmo a partir de FPA e ST, observou-se valores maiores de fósforo extraível Mehlich-1 no solo para este nível de adição.

Não se observou correlação entre Ca trocável e P no solo. O P extraível Mehlich-1 também não se correlacionou com o Al trocável do solo, o que denota que as reduções de teores de alumínio da solução do solo com os tratamentos referentes aos menores níveis de adição podem não ter exercido influência sobre o

P extraível neste Latossolo. E, novamente, não foi verificada correlação entre o P extraível Mehlich-1 do solo e pH CaCl<sub>2</sub>. O fato indica que pode não ter havido influência das variações de pH observadas sobre o P extraível Mehlich-1, mesmo para os tratamentos referentes às testemunhas (lodo alcalinizado puro) e níveis menores de adição (0,436% P).

#### 4.1.1.8 Fósforo extraível Mehlich-1 e Resina trocadora de íons em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis de fósforo de fosfato natural parcialmente acidulado

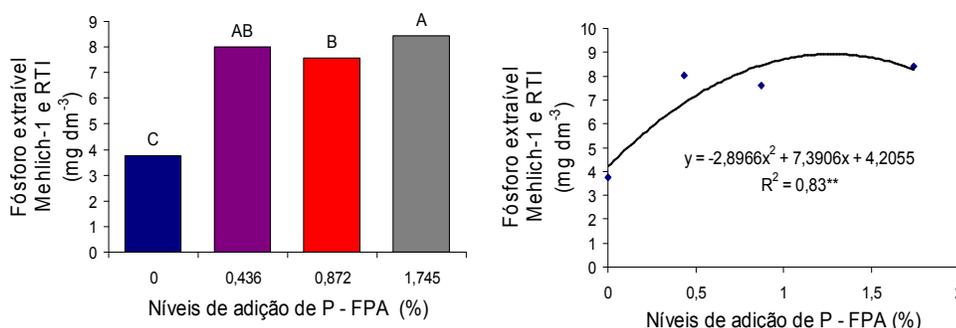
Uma análise de variância foi feita para os resultados de P extraível por dois extratores neste Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P. Para isso tomaram-se o solo tratados com os níveis de 0%, 0,436%, 0,872% e 1,745% P a partir de fosfato natural parcialmente acidulado alvorado e analisou-se para o P extraível pelos extratores de Mehlich-1 e resina trocadora de íons. Assim, 4 níveis de adição de P vs. 2 extratores de P geraram 8 tratamentos com 4 repetições. Foi verificada homogeneidade de variâncias e não foram requeridas transformações de dados.

A análise de variância de P extraível Mehlich-1 e Resina trocadora de íons encontram-se no Apêndice 11, onde se observa que a interação nível de adição de P e extrator de P não foi significativa. No entanto, quando foram analisados isoladamente, os fatores nível de adição de P ( $F_{<0,01}$ ) e extrator de P ( $F_{<0,01}$ ) mostraram-se estatisticamente significativos. Assim, existe, pelo menos, um nível melhor de adição de P e um melhor extrator para esta variável de solo.

Os quatro níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir do FPA aumentaram os teores de P extraível neste Latossolo em relação às testemunhas e ao teor original (Tabela 1). Porém, a comparação de médias de P extraível no solo (Figura 12A.1 e Apêndice 12) indica que os tratamentos referentes aos níveis 0,436% e 1,745% P foram estatisticamente superiores e mostraram os maiores valores de P extraível neste Latossolo. Foi observada, ainda, alta correlação positiva entre níveis de adição e P extraível (Figura 12A.2), o que indica que os resultados podem estar denotando a tendência para os resultados de P extraível

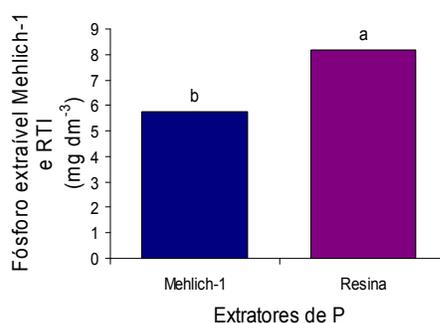
neste Latossolo. Cabe salientar ainda que, apesar da inferioridade estatística verificada para o nível de 0,872% P, numericamente, os valores de P obtidos com este tratamento são muito semelhantes aos obtidos com os melhores níveis de adição de P para esta variável de solo. Complementarmente, pode-se inferir a partir destes resultados uma influência pequena ou nula do P orgânico sobre o teor extraível por ambos extratores.

FIGURA 12 - **(A.1)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.3)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DOS EXTRATORES DE FÓSFORO



**(A.1)**

**(A.2)**



**(A.3)**

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis de adição de fósforo a lodo de esgoto alcalinizado e minúsculas aos extratores de fósforo nas figuras que contêm a comparação de médias (Tukey = P>0,05).

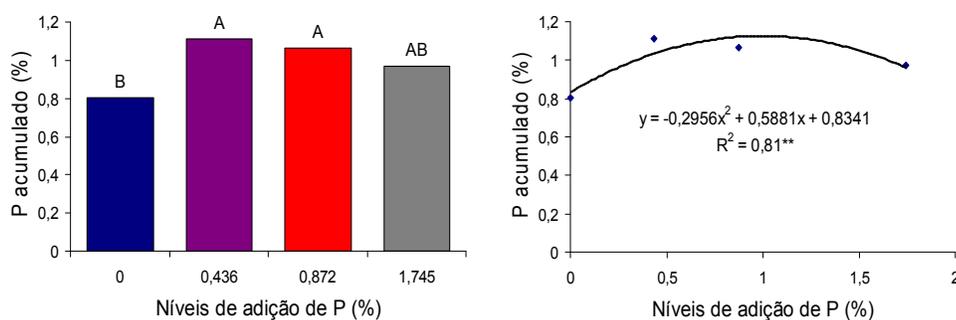
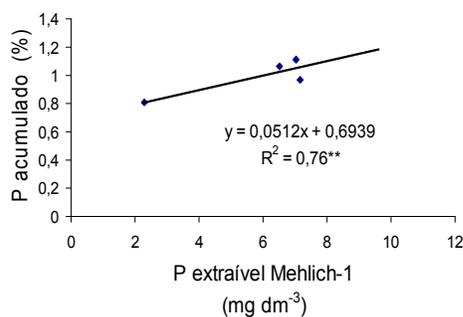
O extrator mais eficiente para extração de P nestas condições experimentais foi a resina trocadora de íons (Figura 12A.3 acima). Segundo RAIJ (1978) a resina retira somente as formas solúveis e lábeis de P e não superestima a quantidade de P extraível para as plantas. A resina trocadora de íons é caracterizada como um extrator acidulado que melhor simula as raízes dos vegetais na absorção de P do solo. Estes resultado pode estar ratificando um incremento real de P extraível neste Latossolo. O pH ligeiramente abaixo de 7,0 da resina proporciona extração de P ligado tanto a cálcio como a ferro e alumínio. MOREIRA et al., (2002), verificou que o extrator resina apresentou maior capacidade de recuperação do P adicionado do que o extrator de Mehlich-1 na cultura da alfafa. Segundo NAKAYAMA et al., (1998) a resina trocadora de íons expressa melhor os teores de P no solo quando comparada com o extrator Mehlich-1 quando uma fonte fosfatada insolúvel em água é aplicada.

#### 4.1.1.9 Percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte, assim como o fator fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado isoladamente, não foram significativos para o conteúdo em percentagem de fósforo acumulado na massa seca total produzida pela parte aérea de feijoeiro (Apêndice 4). No entanto, o fator nível mostrou-se estatisticamente significativo ( $F_{<0,01}$ ) isoladamente. O fato mostra que, independentemente da fonte, existe pelo menos, um melhor nível de adição para esta variável.

A comparação de médias de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro (Figura 13A.1 e Apêndice 13) indica que todos os níveis de adição de P (0,436%, 0,872% e 1,745% P) aumentaram o P acumulado, mostrando-se estatisticamente iguais entre si e superiores às testemunhas. Estreita correlação negativa foi verificada entre a percentagem de P acumulado e níveis de adição de P. O fato indica que a acumulação de P aumenta da testemunha para os níveis de

FIGURA 13 - **(A.1)** PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

0,436% e 0,872% P e, a partir daí, decai sensivelmente, adequando-se a um modelo quadrático observável na Figura 13A.2 acima. O P acumulado pelo feijoeiro também se correlacionou com o P extraído pelo extrator de Mehlich-1, ajustando-se ao modelo linear observado (Figura 13A.3 acima).

Entretanto, saliente-se que os teores de P nos grãos e na parte aérea deste cultivar de feijoeiro (dados não mostrados) estiveram acima do que se encontra na literatura em geral. Este fato se refletiu na percentagem de P acumulado pelo feijoeiro neste Latossolo (0,8% a 1,12%). Segundo MARSCHNER (1995) o P encontra-se, de maneira geral, na faixa de 1 a 5 g kg<sup>-1</sup> (0,1 a 0,5%) no tecido vegetal em fase de crescimento e, concentrações acima de 10 g kg<sup>-1</sup> (1%) são qualificadas como fitotóxicas. Cabe salientar que, quando se compara plantas de feijoeiro desenvolvidas no campo, plantas cultivadas em casa de vegetação apresentam maiores concentrações de P no tecido, pois, em vasos o nutriente está em maior contato com as raízes da cultura (HAAG e MALAVOLTA, 1967; COBRA NETO, 1967).

Adicionalmente, MALAVOLTA (1980) salienta que, “dentre os fatores que afetam a absorção de um nutriente pelas plantas, devem ser considerados: o pH, o equilíbrio entre a quantidade trocável do elemento no solo e a concentração do nutriente na solução de solo”. Dessa forma, infere-se como fatores que podem explicar estes resultados, considerando-se os teores de P verificados no tecido, com conseqüente reflexo na acumulação de P pelo feijoeiro:

a) a relação Ca:Mg originalmente verificada neste Latossolo (1,5:1,0) (Tabela 1) e no lodo (cerca de 1,7:1), que podem ter proporcionado maior absorção e conseqüente acumulação de quantidades adequadas tanto de Ca quanto de Mg pelas plantas, incrementando sinergicamente, a acumulação de P. Estes valores estiveram abaixo, porém, próximos dos obtidos por HERNANDEZ e SILVEIRA, (1998), que obtiveram relações de 2:1 e 3:1 como mais propícias ao equilíbrio entre nutrientes e à maior absorção de P pelo milho. Estes mesmos autores observaram que, valores acima de 3:1 causaram quedas no crescimento e na produção de milho em razão do efeito antagônico do Ca na absorção de Mg e, conseqüentemente, na absorção de P, pois, o Mg é considerado um carregador de P na planta. Segundo MALAVOLTA (2006) a absorção do H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> é máxima quando o magnésio está disponível em concentrações adequadas na superfície de raízes;

Além disso, observe-se que todos os tratamentos com P possuíam nutrientes como N, Ca, Mg, S, e Cu, Zn, etc., além do P orgânico liberado do lodo (0,151%) (LOGAN e HARRISON, 1995 e Tabela 3) presentes tanto no lodo alcalinizado puro quanto nas fontes de P nas misturas de adição, que podem ter proporcionado

condições para altas absorções e conseqüente acumulação de P no tecido. De acordo com SANEPAR, (1997) do total de P presente nos lodos de esgoto, cerca de 50% estará disponível às plantas já no primeiro ano de aplicação. No trabalho de KIKUTI et al., (2007) foram utilizadas doses de 0, 100, 200 e 300 kg.ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em Latossolo Vermelho distroférico típico, de textura argilosa a partir de superfosfato triplo. Obtiveram ajustes de dados a modelo quadrático crescente de doses de N sobre os teores de P nas folhas com pecíolos. Estes mesmos autores observaram que, à medida que aumentaram as doses de N aplicadas, obtiveram aumento nos teores foliares de P e, na comparação dos teores médios de P nas folhas com pecíolos do feijoeiro em função das doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, observaram que os resultados de P foliar estavam dentro das faixas adequadas propostas MARTINEZ et al., (1999); WILCOX e FAGERIA, (1976) e MALAVOLTA, (1992). No presente experimento, uma dose de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N foi adicionada em cobertura aos 6 dias da semeadura.

#### 4.1.2 Altura de plantas e componentes de produção de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

As tabelas de análises de variância de dados de altura de plantas e componentes de produção (grãos e produção de massa seca total da parte aérea) de feijoeiro cultivado em Latossolo vermelho distrófico são apresentados no Apêndice 14. Foi verificada homogeneidade de variâncias para todos as variáveis avaliadas e não foram requeridas transformações de dados.

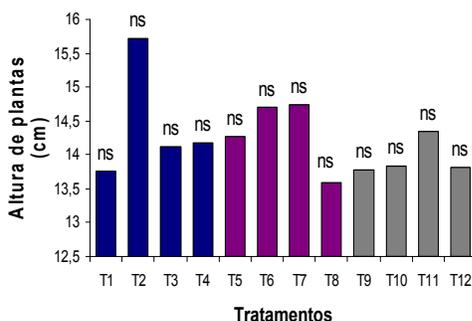
#### 4.1.2.1 Altura de plantas de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado, assim como estes fatores isolados não foram estatisticamente significativos para altura de plantas de feijoeiro (Figura 14 e Apêndice 14).

Um crescimento inicial reduzido e pouca biomassa foi produzida pelas plantas com todos os tratamentos (MALAVOLTA et al., 1980; OLIVEIRA et al., 1985), a despeito de significâncias estatísticas observadas nas análises da maioria das variáveis avaliadas ao final de ciclo. O fato se deve, provavelmente, à baixa disponibilidade inicial de P e à carência de alguns micronutrientes e macronutrientes no início do desenvolvimento de plantas dado o baixo pH deste Latossolo (Tabela 1) (OLIVEIRA et al., 1988). A deficiência de P também está relacionada, dentre os problemas mais comuns, com o Ca, Mg e Zn (ZABOUROUSCI e LOPEZ, 1982). Todas as unidades experimentais mostraram, no início de ciclo, acentuada queda de folhas e nítida deficiência de P nas folhas mais velhas, excepcionalmente nas testemunhas. O fato pode dever-se à translocação deste nutriente, bastante móvel nas plantas (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997).

Um outro fator a ser considerado é a competição entre plantas no vaso (6 plantas vaso<sup>-1</sup>), que reduz o volume de solo explorado pelo sistema radicular em detrimento de seu crescimento e, conseqüentemente, da altura das plantas e componentes de produção em geral. Todas as observações de início de ciclo, feitas para este Latossolo Vermelho distrófico, de Arapoti-PR, foram ratificadas com experimento em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de Contenda-PR.

FIGURA 14 - ALTURA DE PLANTAS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFÓRO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)



T1 a T4 = níveis de adição de fósforo a partir de FPA  
 T5 a T8 = níveis de adição de fósforo a partir de SS  
 T9 a T12 = níveis de adição de fósforo a partir de SS

**Nota:** ns = não significativo (Tukey  $P > 0,05$ )

#### 4.1.2.2 Produção de grãos de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa para a produção de grãos de feijoeiro ( $F_{<0,01}$ ) em Latossolo Vermelho distrófico (Apêndice 14). O fato denota dependência entre fatores e, para se obter o melhor nível de adição para esta variável de produção, dever-se-á observar a fonte utilizada.

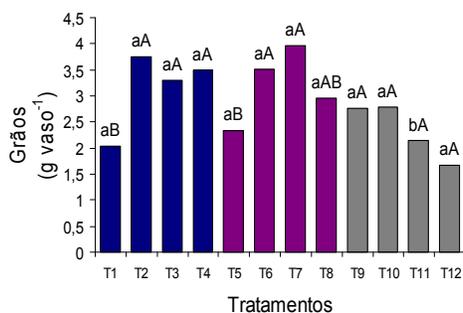
A Comparação de médias de produção de grãos indica que os tratamentos referentes aos níveis de adição de 0,436%, 0,872% e 1,745% P a partir do FPA e SS (0,436% e 0,872% P) mostraram-se estatisticamente superiores (Figura 15A.1 abaixo e Apêndice 15), aumentando a produção de grãos em relação às testemunhas. Foi verificada significativa correlação quadrática entre níveis de adição de P a partir de FPA e produção de grãos (Figura 15A.2). A correlação entre níveis de adição de P com a fonte SS e grãos produzidos foi altamente significativa (Figura

15A.3). Estes resultados indicam que, para ambas as fontes, a produção de grãos foi a mesma tanto nos menores níveis de adição de P, que possuem maiores doses puras de lodo nas misturas quanto nos níveis maiores, com menores doses puras de lodo de esgoto alcalinizado. Dessa forma, conjectura-se que, mesmo doses intermediárias de lodo de esgoto tratado alcalinamente (cerca de  $10,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) podem ser utilizadas em mistura com P. O ST mostrou-se a pior fonte de adição de P para a produção de grãos em relação à testemunha. Todavia, é nítida a produção maior de grãos com os menores níveis de adição de P a partir de ST, o que pode ser observado na Figura 15A.4.

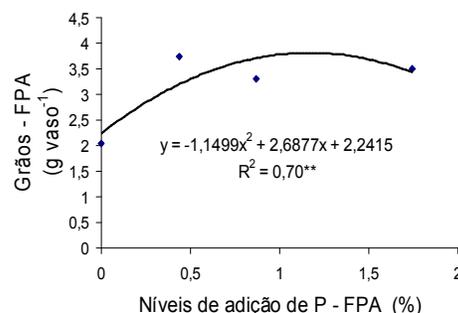
A produção de grãos também aumentou linearmente com o aumento do P extraível Mehlich-1 quando o solo foi tratado com lodo adicionado de P de FPA (Figura 16A.1). É fato notório na literatura, que indica estreita relação entre produção de grãos de feijoeiro e teor disponível de P no solo por determinado extrator. Neste experimento, as plantas de feijoeiro não alcançaram seu potencial máximo de produtividade dado o reduzido crescimento ocasionado pela baixa disponibilidade inicial de micro e macronutrientes em função da acidez do solo (Tabela 1). Todavia, o maior aumento de pH  $\text{CaCl}_2$  do solo foi observado com o nível de 0,436% de adição de P, que esteve dentre os tratamentos que proporcionaram maior produção de grãos com todas as fontes. FAGERIA e STONE (1999) verificaram relação direta entre aumento de pH do solo e produção de grãos de feijoeiro. Efeito contrário foi exercido pela saturação de acidez do solo, que reduziu drasticamente a produção desta cultura (FAGERIA, 2001). Estes mesmos autores verificaram relação muito significativa entre produção de grãos e saturação de bases.

REDDY et al., (2004) avaliou o efeito sobre a produção de soja e trigo de adições contínuas de quatro taxas de resíduo de galinheiro (0,0; 4,0; 8,0 e  $16,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) como fonte de P para a sucessão das culturas num Vertissolo com uma dose de  $22,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de P fosfato diamônico e sem fósforo ( $0,0 \text{ kg ha}^{-1}$  de P). A produtividade de soja e trigo aumentaram significativamente com a adição de resíduo acompanhada de adubo fosfatado.

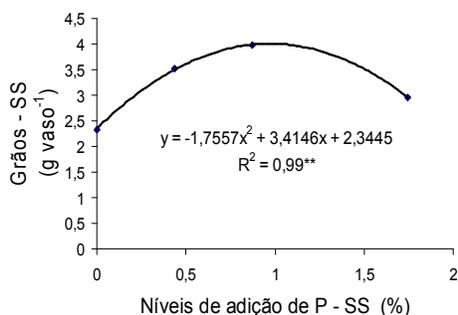
FIGURA 15 - (A.1) PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



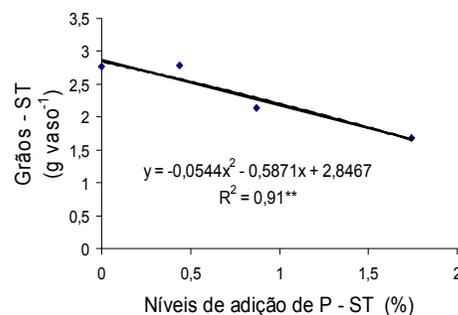
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

**Nota:** T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

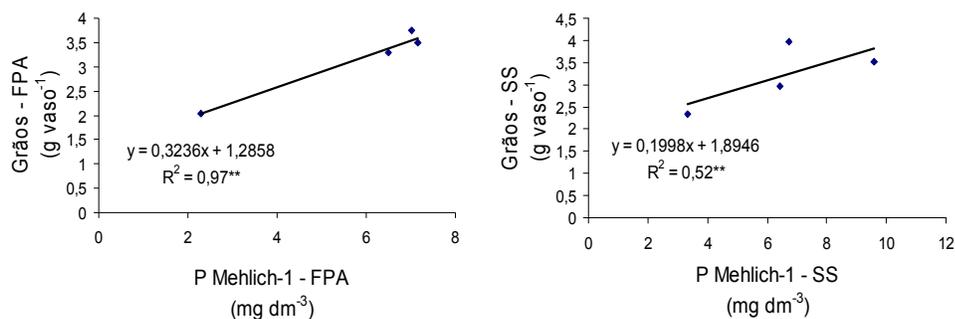
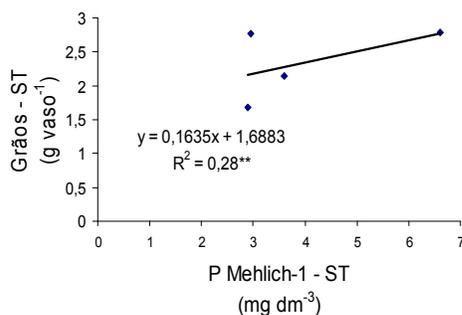
T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

VIEIRA et al., (2005) trataram um Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/argilosa e cultivaram soja com dose zero de lodo de esgoto; soja com 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja com 3 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e soja com adubação química. Obtiveram maior produtividade com as duas maiores doses de lodo. Em média, esses tratamentos produziram cerca de 547 e 163 kg ha<sup>-1</sup> de grãos a mais, respectivamente, do que os tratamentos testemunha e com adubação mineral. Nos tratamentos que não receberam adubação fosfatada ou que a receberam em quantidades não suficientes, a produtividade foi menor. As produtividades da soja dos dois anos agrícolas demonstraram que tanto 3 quanto 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo foram suficientes para suprir as demandas da cultura em P. BISCAIA e MIRANDA (1996) obtiveram aumentos na produtividade da cultura do milho com a adição de lodo de esgoto. PEDROZA et al. (2003) avaliaram a aplicação de lodo nas doses semelhantes às contidas nos menores níveis de adição de P do presente experimento, de 2 a 12 Mg ha<sup>-1</sup> na cultura do algodoeiro, que respondeu favoravelmente com aumentos de produtividade. Em experimento conduzido a campo, utilizando um Latossolo Vermelho distrófico, SILVA, RESCK e SHARMA (2002) aplicaram doses altas de 54, 108 e 216 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido associado à aplicação de calcário (1 Mg ha<sup>-1</sup>) e à adubação mineral completa. Os resultados indicaram manutenção da produtividade de milho por três anos, obtida por dose única de lodo de esgoto no primeiro ano, sem o emprego de outro insumo, havendo efeito residual mesmo na dose mais baixa. Segundo LOURENÇO et al., (1995) a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas tem conduzido a aumentos na produtividade das culturas do feijão, milho e bractinga. WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO, em estudos de campo, trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxa de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada de Minjingu. Na média a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> na forma de rocha fosfatada aumentou a produção de grãos em relação ao controle em 71% e 10% nos solo das localidades de Busia e Siaya, respectivamente. A combinação da rocha com materiais orgânicos contudo, aumentou a produção de grãos. O maior aumento foi observado no solo de Siaya na primeira estação de cultivo. Em Busia, a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> da rocha

FIGURA 16 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE ST

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

P Mehlich-1-FPA = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com FPA

P Mehlich-1-SS = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com SS

P Mehlich-1-ST = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com ST

Grãos - FPA = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de FPA

Grãos - SS = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de SS

Grãos - ST = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de ST

fosfatada com restos culturais de milho na taxa de 2 Mg ha<sup>-1</sup> produziram 67% mais grãos comparada com a produção obtida com a aplicação do P sozinho. Do mesmo modo na localidade de Siaya a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> na forma da rocha combinada com esterco de curral a 2 Mg ha<sup>-1</sup> proporcionou produção de grãos 60% maior comparado com a produção obtida com a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> sozinho. Em ambas localidades foi monitorado o efeito residual dos tratamentos com P e materiais orgânicos na segunda estação e nenhum dos tratamentos foram reaplicados. Na média, os níveis de produção em Busia foram sensivelmente maiores na primeira estação. Em Siaya, contudo, na segunda estação a produção foi muito baixa comparada à da primeira estação. Os tratamentos com materiais orgânicos continuaram a exercer variados efeitos mas, na média, foram positivos. No entanto, não houve interação entre P e aplicação de materiais orgânicos na produção em Busia na primeira estação. Na segunda estação contudo, onde o P não foi aplicado foram maiores as produções com os tratamento com 1 Mg ha<sup>-1</sup> de materiais orgânicos, o oposto de onde o P foi aplicado. Em Siaya, a interação dos efeitos entre P e materiais orgânicos na produção foram observados nas duas estações. Na primeira estação os tratamentos que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> sem material orgânico, esterco de curral ou restos de milho, proporcionaram menores produções que nos tratamentos que receberam somente material orgânico. À taxa de 1 Mg ha<sup>-1</sup>, ambos tratamentos com material orgânico, com ou sem P, deram produções similares, mas a 2 Mg ha<sup>-1</sup>, os tratamentos que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> deram maiores produções que aquelas sem P. Embora muito reduzida, produções similares foram observadas em segunda estação.

#### 4.1.2.3 Produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa para a produção de massa seca total de feijoeiro ( $F_{<0,01}$ ) em Latossolo Vermelho distrófico (Apêndice 14). O fato mostra que tais fatores são dependentes

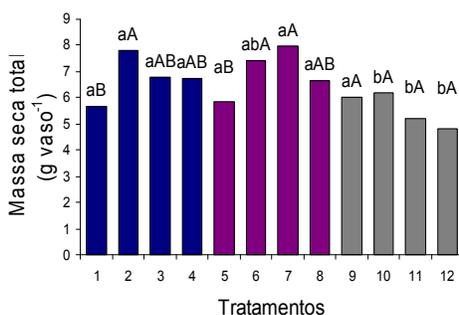
entre si, existindo, assim, pelo menos, um nível melhor e uma melhor fonte de adição para esta variável.

Todos os tratamentos a partir do FPA e SS aumentaram a produção total de massa seca de feijoeiro em relação às testemunhas, exceto para a fonte ST, com a qual se observou uma redução na produção com o aumento dos níveis de adição de P. A comparação de médias para a produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro (Figura 17A.1 e Apêndice 16) indica que os menores níveis de adição de P a partir de FPA e SS (0,436% e 0,872% P), similarmente ao ocorrido com a produção de grãos, foram iguais entre si e superiores às testemunhas e aos todos os níveis de adição a partir do ST para esta variável. Pequena correlação quadrática foi observada para massa seca total produzida em função de níveis de adição de P a partir de FPA (Figura 17A.2). Quando se gerou curva de tendência para massa seca total em função de níveis de adição de P a partir de SS a correlação foi altamente significativa (Figura 17A.3). Para o ST, o melhor nível de adição foi 0,436% P e, a medida em que aumentaram os níveis de adição, a produção de massa seca diminuiu linearmente (figura 17A.4).

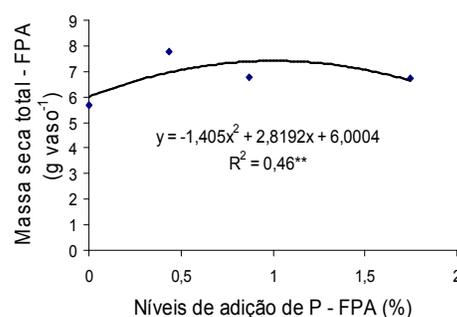
Numericamente, o tratamento referente ao nível de 0,436% P a partir de FPA e de 0,436% e 0,872% P a partir do SS proporcionaram as maiores produções de massa seca total. A partir disso, pode-se conjecturar que, a despeito das alterações positivas sobre as características químicas do solo, lodo de esgoto alcalinizado não exerceu efeito sobre a disponibilidade de P para as plantas e tanto quantidades pequenas quanto intermediárias de lodo de esgoto alcalinizado podem ser misturadas com P.

Correlações positivas foram verificadas para a massa seca total produzida e o teor de P extraível mehlich-1 no solo, indicando que, com um aumento do teor extraível de P mehlich-1, houve aumento proporcional da produção de massa seca total de feijoeiro (Figuras 18A.1, 18A.2 e 18A.3). Também houve uma estreita correlação positiva entre a produção de grãos e massa seca total de feijoeiro (Figura 19A.1). Ou seja, a quantidade de grãos produzida esteve altamente correlacionada

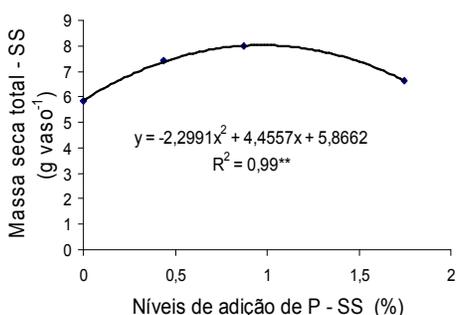
FIGURA 17 - **(A.1)** PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



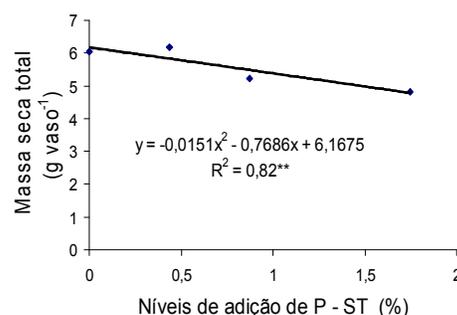
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

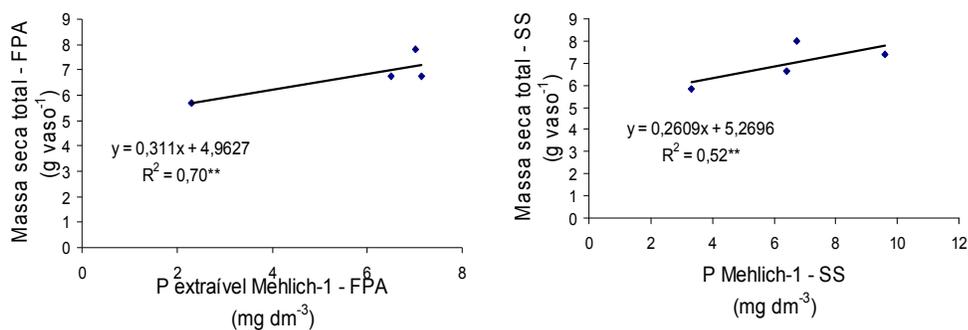
T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

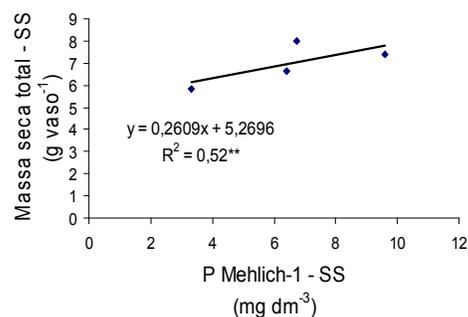
**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

com a produção total de massa seca da parte aérea de feijoeiro para as três fontes de adição, inclusive o ST. De acordo com FAGERIA, BARBOSA FILHO e STONE, (2004) a produção de massa seca está diretamente associada com a produtividade de feijoeiro, além de se correlacionarem, também com o teor e acumulação de P na cultura”.

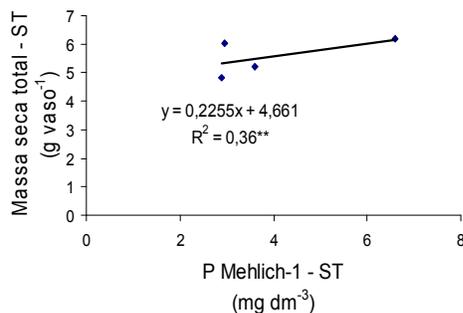
FIGURA 18 - (A.1) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA ; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 A PARTIR DE SS (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 A PARTIR DE ST



(A.1)



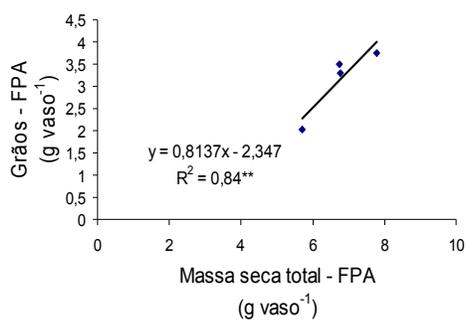
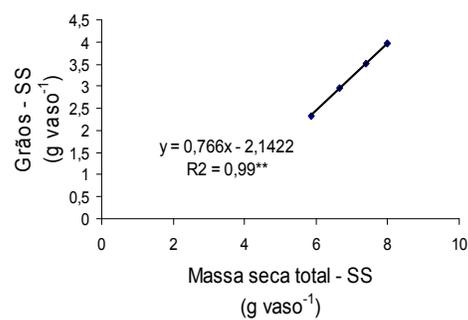
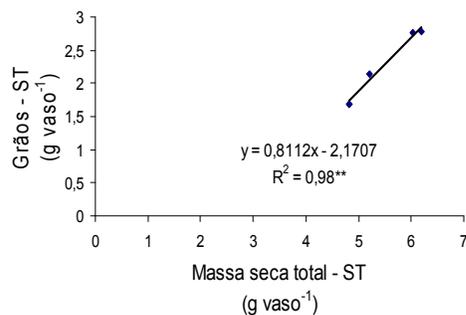
(A.2)



(A.3)

**Nota:** Letras minúsculas referem-se às fontes e maiúsculas aos níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado no gráfico que contém a comparação de médias.

FIGURA 19 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA ; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE ST

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

#### 4.1.2.4 Índices de eficiência agronômica

Os índices de eficiência agronômica (IEA) gerados segundo CHIEN, SALE e FRIESEN (1990a) a partir da massa seca total da parte aérea de feijoeiro produzida com os melhores níveis de adição, ou seja, os níveis de 0,436%, 0,872% e 1,745% de adição de P oriundo de FPA e SS em lodo de esgoto alcalinizado, encontram-se na Tabela 9.

TABELA 9 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO A PARTIR DE DADOS DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

NAP	MSTPA-ST	MSTPA-SS	IEA-SS	MSTPA-FPA	IEA-FPA
(%)	-----(g vaso <sup>-1</sup> )----		(%)	(g vaso <sup>-1</sup> )	(%)
0,436	6,188	7,407	119,7	7,79	125,89
0,872	5,217	7,977	152,9	6,77	129,77
1,745	4,285	6,645	155,08	6,745	157,41

NAP: níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado

MSTPA-ST = massa seca total produzida com os níveis de adição de P a partir de ST

MSTPA-SS = massa seca total produzida com os níveis de adição de P a partir de SS

IEA-SS = Índice de eficiência agronômica de melhores níveis de adição de P a partir de SS

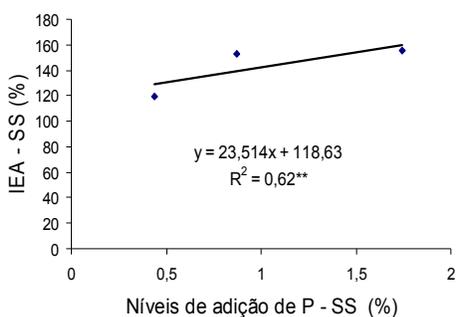
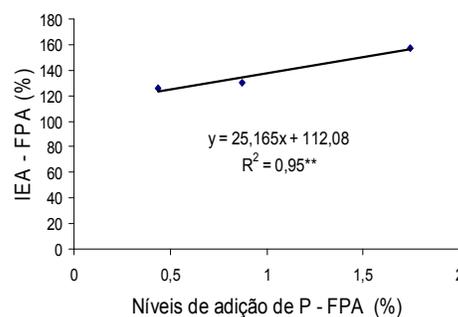
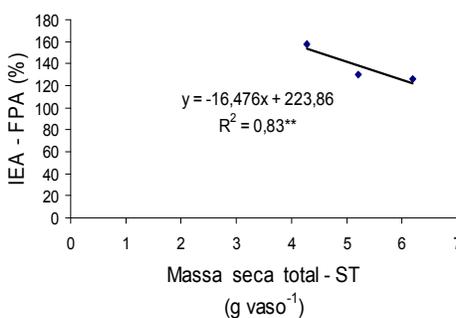
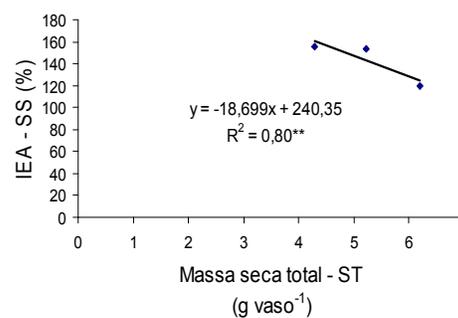
MSTPA - FPA = massa seca total produzida com os melhores níveis de adição de P a partir de FPA

IEA/FPA = Índice de eficiência agronômica para os níveis de adição de P a partir de FPA

Os IEA em função de níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS mostraram baixa correlação linear com o aumento de níveis de adição (Figura 20A.1). Para os IEA gerados com dados de massa seca total produzida com os mesmos níveis de adição de P a partir de FPA verificou-se alta correlação positiva (Figura 20A.2). Entretanto, ao se observar os valores de produção de massa seca total obtida com os níveis de 0,436%, 0,872% e 1,745% P a partir da fonte de referência, conjectura-se que o aumento de IEA em função do aumento de níveis de adição com ambas fontes pode dever-se ao decréscimo na produção de massa seca total observado com a fonte de adição ST (Figuras 20A.3 e 20A.4). Dessa forma, não ocorreu um aumento na produção e conseqüente aumento de IEA com o aumento de níveis de adição de P a partir das fontes testadas e pode-se, então, inferir que os melhores IEA foram obtidos com o tratamentos referentes aos níveis

de 0,436% (1%  $P_2O_5$ ) de adição de P a partir de ambas as fontes uma vez que foram calculados com a maior produção de massa seca total proporcionada pela fonte de referência (ST). Dessa forma, o FPA mostrou-se 25,85% mais eficiente na produção de massa seca total de feijoeiro em relação ao ST e o SS 19,7%. Assim, pode-se inferir que o método de cálculo de IEA mostrou-se satisfatório para esta utilização particular, não se verificando valores excessivamente altos.

FIGURA 20 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO; **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA EM FUNÇÃO DA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO PRODUZIDA POR NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE SUPERFOSFATO SIMPLES EM FUNÇÃO DA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO PRODUZIDA POR NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO

**(A.1)****(A.2)****(A.1)****(A.2)**

A menor produção de massa seca a partir do ST como fonte de adição pode-se dever ao maior estresse das plantas em função da baixa fertilidade inicial de solo e pH baixo além de sua granulometria mais grosseira (Tabela 4), não permitindo acesso de plantas ao P desta fonte.

Para os maiores níveis de adição de P, que possuíam menores quantidades de lodo alcalinizado puro nas misturas, com conseqüente redução da quantidade de Mg, que leva a uma absorção máxima de P (MALAVOLTA, 2006), pode não ter ocorrido a contribuição do P oriundo da dissolução do biossólido, levando estes tratamentos a menores produções de massa seca total. Também a adsorção, apesar de ser processo lento (BARROW, 1985) e a precipitação do P desta fonte (NOVAIS e SMITH, 1999) com Al trocável inicial neste Latossolo (Tabela 1) deve ter corroborado com a menor produção de massa seca e conseqüente redução de eficiência verificada.

## 4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO DE EXPERIMENTO COM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR

### 4.2.1 Dados químicos de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico e percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro

As tabelas de análise de variância e comparação de médias de variáveis químicas de solo após experimento em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico encontram-se no Apêndice 17. O pH  $\text{CaCl}_2$ , Al, Ca e Mg trocáveis, acidez potencial, carbono orgânico, P extraível Mehlich-1 e percentagem de P acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro mostraram homogeneidade de variâncias e não foram requeridas transformações de dados.

As tabelas de análise de variância e comparação de médias de estudo comparativo de P extraível Mehlich-1 e resina trocadora de íons a partir de tratamentos com fosfato natural parcialmente acidulado alvorada também encontram-se no Apêndice 24. Foi verificada homogeneidade de variâncias e não foram requeridas transformações de dados.

#### 4.2.1.1 Índice de pH CaCl<sub>2</sub> de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

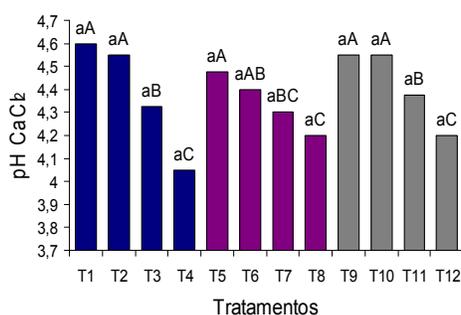
A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa ( $F_{<0,05}$ ) para o índice de pH CaCl<sub>2</sub> em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 17), indicando que estes fatores são dependentes entre si para esta variável. Assim, para se chegar ao melhor nível de adição de P dever-se-á observar a fonte de P utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado que outros para esta variável.

A comparação de médias de pH CaCl<sub>2</sub> (Figura 21A.1 e Apêndice 18) indica que os tratamentos constituídos pelos menores níveis de adição de P (testemunhas = 0% P e 0,436% P) mostraram-se estatisticamente superiores para todas as fontes de adição e exerceram maiores efeitos sobre o pH do solo. Foram verificados aumentos de até 0,6 unidade em comparação ao pH original deste Latossolo (Tabela 1). Assim, estes tratamentos mostraram-se mais eficientes para o aumento do pH e conseqüente redução da acidez deste Latossolo de textura argilosa. O fato é ratificado pelas altas correlações negativas verificada para pH CaCl<sub>2</sub> em função de níveis de adição de P considerando-se as fontes individuais de P (Figuras 21A.2, 21A.3 e 21A.4). Este fato indica que, para cada fonte de adição, o pH aumenta com o aumento de quantidades de lodo de esgoto alcalinizado puro presente nas misturas referentes aos menores níveis de adição (Tabela 7). Ao contrário disso, com o aumento de níveis, e conseqüente redução de quantidades de lodo nas misturas, observou-se, para a fonte individual, uma redução do pH, que se manteve em valores muito semelhantes ao pH original deste Latossolo (Tabela 1).

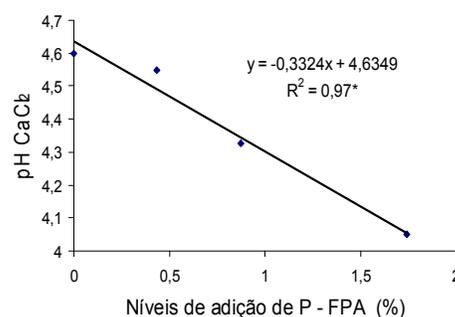
Os valores de pH observados para ambos Latossolos foram muito semelhantes, a despeito do maior potencial tamponante de pH deste LVA<sub>dt</sub> de textura argilosa, de Contenda - PR em relação ao LV<sub>dt</sub> de textura média, de Arapoti-PR. Este fato pode ser ratificado pelo maior teor de carbono (Tabela 1) e maior quantidade de argila neste LVA<sub>dt</sub> (Tabela 2). Semelhantemente ao LV<sub>dt</sub>, as maiores quantidades de lodo de esgoto alcalinizado puro presentes nas testemunhas (0% P) e nível 0,436% de adição de P, respectivamente, 10,5 Mg ha<sup>-1</sup> e 10,0 Mg ha<sup>-1</sup> (Tabela 7), aliadas ao seu

poder de neutralização (Tabela 3), podem ter sido responsáveis pelo aumento nos valores de pH obtidos com estes tratamentos.

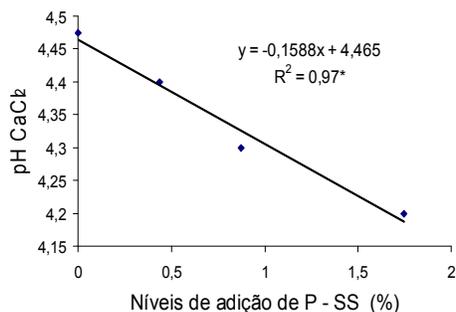
FIGURA 21 - **(A.1)** pH  $\text{CaCl}_2$  EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE UM FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE pH  $\text{CaCl}_2$  EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



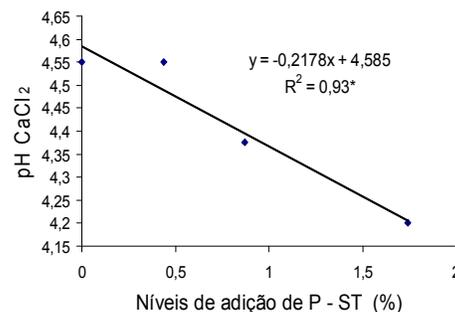
**(A.1)**



**(A.2)**



**(A.3)**



**(A.4)**

T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

Dentre os inúmeros trabalhos que indicam a eficiência de lodo de esgoto alcalinizado para o aumento de pH e redução de acidez do solo estão os de MELO e MARQUES (2000) e OLIVEIRA et al., (2002), fato que ocorre, basicamente, em função da reação alcalina no solo dos materiais utilizados no tratamento destes biossólidos (cal virgem (CaO) ou cal hidratada (Ca(OH)<sub>2</sub>). Os resultados ora obtidos salientam a idéia de que o tipo de tratamento que este biossólido recebeu determinará a maior ou menor capacidade de alteração do pH do solo (CLAPP et al., 1986).

Como já relatado para o experimento com LVdt, cabe aqui salientar que, o pH CaCl<sub>2</sub>, Ca<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup> e H + Al são componentes da acidez do solo. O Al<sup>3+</sup> e a acidez potencial, que serão discutidos a seguir, relacionam-se negativamente com as demais variáveis, o que indica que um efeito de aumento de pH proporciona a diminuição de seus valores, enquanto os valores de Ca trocável aumentam. Alterações no pH do solo em função da aplicação de lodo de esgoto dependem de sua textura, capacidade tamponante e do tipo de tratamento que o lodo de esgoto recebeu (CLAPP et al., 1986). O nível de adição 0,436% P mostrou o maior aumento numérico nos valores de pH.

Dependendo da fonte de adição de P, estas também podem exercer influência sobre o pH do solo (SLOAN e BASTA, 1995; BELTRÁN et al., 1998; VIEIRA et al., 2005; OSZTOICS et al., 2005). A literatura indica que fosfatos naturais exercem maior influência sobre o pH do solo. Fato este que ocorre basicamente em função de sua reação diferente no solo em relação às fontes mais solúveis de P, e à presença de carbonatos nas rochas mais reativas, tais como o fosfato natural parcialmente acidulado (alvorada) aqui utilizado, cuja parte não acidulada (fosforita alvorada) é uma rocha de alta reatividade no solo.

#### 4.2.1.2 Alumínio trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado por diferentes níveis e fontes de fósforo

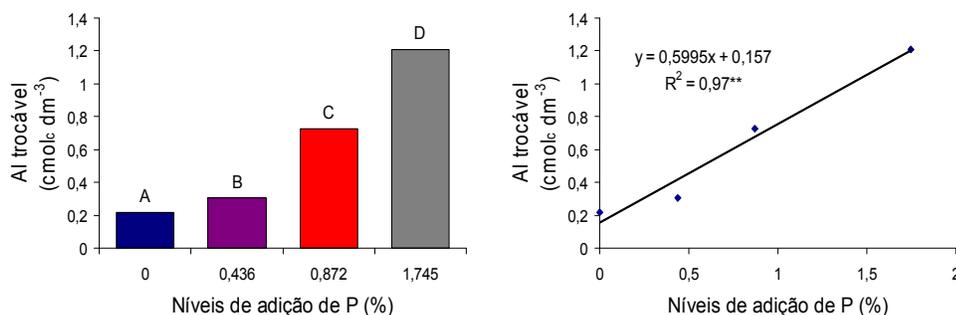
A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para o Al trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 17), o que indica que são independentes entre si. Entretanto, os fatores

nível e fonte de adição mostraram-se significativos isoladamente ( $F_{<0,01}$ ). Dessa forma existe, pelo menos, um nível e uma fonte melhores para adição de P em relação a esta variável.

Todos os tratamentos reduziram o  $Al^{3+}$  trocável do solo em relação ao seu teor original (Tabela 1). Entretanto, a comparação de médias de  $Al^{3+}$  trocável no solo mostra que as testemunhas (0% P) e os níveis 0,436% P (Figura 22A.1 e Apêndice 19) proporcionaram diminuição linear de concentrações de Al trocável neste Latossolo (Figura 22A.2). Fato este verificado pelo aumento das concentrações trocáveis do elemento a medida em que aumentam os níveis de adição de P e a consequente diminuição das quantidades de lodo de esgoto alcalinizado nas misturas de adição de P (Tabela 7). Essa diminuição nos teores trocáveis de Al pode-se dever, adicionalmente, à precipitação com P do fertilizante, considerada a condição ácida e os altos teores do elemento originais neste Latossolo (Tabela 1).

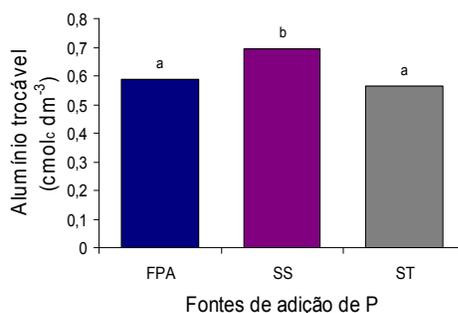
Quanto às fontes de adição, as menores médias de  $Al^{3+}$  trocável foram o FPA, o que pode ter ocorrido em função do efeito corretivo de rochas fosfatadas reativas constituinte da parte não acidulada deste fosfato parcialmente acidulado; e o ST, que possui maior conteúdo de P em relação às demais fontes (Tabela 4). Assim, o  $Al^{3+}$  pode ter precipitado com este P solúvel desta fonte. O SS mostrou o menor efeito sobre o teor de  $Al^{3+}$  trocável neste Latossolo (Figura 22A.3). O contrário deveria ter ocorrido uma vez que essa fonte possui em sua composição elevada concentração de sulfato de cálcio (cerca de 40%). De acordo com PITTA et al., (2007), o gesso é empregado quando se exige a diminuição de concentrações tóxicas do alumínio trocável no solo. Fato que ocorre em função da dissolução do sulfato de cálcio, tornando o  $Ca^{2+}$  livre na solução no solo, que irá deslocar o  $Al^{3+}$  para a solução. Este  $Al^{3+}$  por sua vez, reagirá com o ânion sulfato, menos tóxico às plantas (CFSEMG, 1999).

FIGURA 22 - (A.1) ALUMÍNIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; (A.3) ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE FONTE DE ADIÇÃO DE FÓSFORO



(A.1)

(A.2)

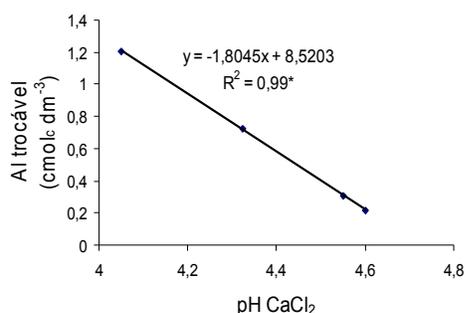


(A.3)

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

Dessa forma, a estreita correlação negativa observada entre  $Al^{3+}$  trocável e pH  $CaCl_2$  (Figura 23) indica que, aumentos de valores de pH  $CaCl_2$  e consequente diminuição da acidez do solo a partir destes tratamentos, estão associadas à diminuição de teores de  $Al^{3+}$  trocável do solo e, conseqüentemente, a diminuição da acidez potencial verificada para este Latossolo.

FIGURA 23 - CURVA DE TENDÊNCIA DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub> EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO



Trabalhos desenvolvidos recentemente indicaram diminuição linear e altamente significativa de Al<sup>3+</sup> trocável em função de doses crescentes de N-viro soil e lodo caleado. Dentre eles está o de SLOAN e BASTA (1995) que trabalharam com três solos ácidos americanos, de texturas arenosa e média. À taxas de aplicação semelhantes às praticadas neste experimento e pH acima de 5,0 as concentrações de AL trocável eram negligíveis. Taxas maiores de aplicação reduziram o alumínio abaixo do limite de detecção (<0,04 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Estes autores ainda observaram que, em menor extensão, um lodo de esgoto não tratado alcalinamente também reduziu a presença de Al na forma trocável no solo. FIA, MATOS e AGUIRRE (2005) também observaram que, tal como ocorre com a calagem, a aplicação de doses 0; 33,6; 67,4; 101,0; 134,7 e 168,4 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto alcalinizado proporcionou redução de formas trocáveis de Al<sup>3+</sup> num Latossolo Vermelho-Amarelo distroférico ácido que, segundo os autores, pode ter ocorrido em função da precipitação na forma de hidróxidos, reduzindo, assim, sua fitotoxicidade. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) verificaram resultados contrários a estes, e verificaram que os teores de Al trocável na camada superficial do solo aumentaram em função da aplicação das doses crescentes de lodo de esgoto não tratado alcalinamente e com alto pH.

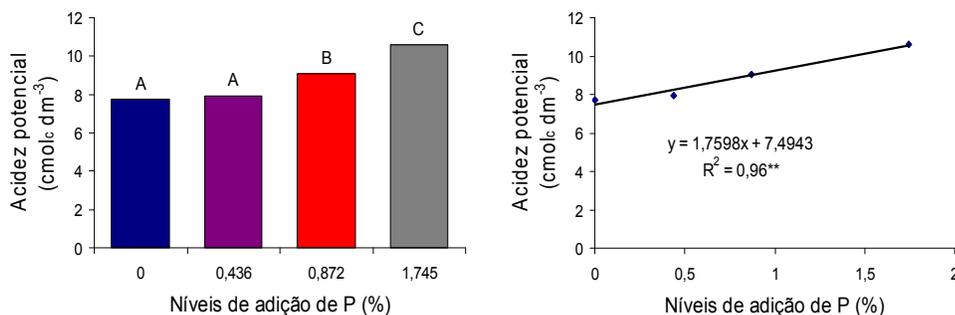
#### 4.2.1.3 Acidez potencial em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para acidez potencial de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 17), mostrando-se assim, independentes entre si. No entanto, os fatores nível e fonte de adição isolados foram estatisticamente significativos ( $F_{<0,01}$ ). Dessa forma existe, pelo menos, um melhor nível e uma melhor fonte de adição para esta variável de solo.

A comparação de médias de acidez potencial (Figura 24A.1 e Apêndice 20) indica que os menores níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado (0% P e 0,436% P) exerceram maior efeito sobre acidez potencial, reduzindo-a em até 4,0  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  neste Latossolo. O fato pode estar relacionado com a presença de maiores doses de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas destes tratamentos, o que pode ser ratificado pelo aumento linear altamente significativo de acidez potencial em função do aumento de níveis de adição de P (Figura 24A.2) e consequente redução de quantidades de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas (Tabela 7).

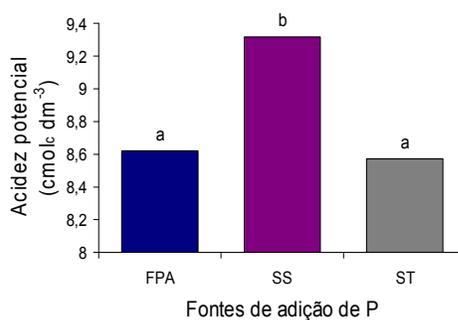
Analogamente ao experimento com LVdt de Arapoti-PR, para os maiores níveis de adição de P a acidez potencial manteve-se em valores pouco abaixo dos originalmente observados (Tabela 1). O fato era esperado e pode estar confirmando, neste Latossolo, o efeito predominante de doses puras de lodo alcalinizado em função de sua reação alcalina e alto poder de neutralização da acidez do solo (Tabela 3; LOGAN e HARRISON, 1995) e, como consequência, as reduções lineares de acidez potencial em função da redução do pH (Figura 25A.1) e Al trocável do solo (Figura 25A.2). Cabe ainda salientar-se que estes resultados são análogos aos obtidos para a Al trocável, neste Latossolo.

FIGURA 24 - (A.1) ACIDEZ POTENCIAL DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) e SUPERFOSFATO TRIPLA (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; (A.3) ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE FONTE DE ADIÇÃO DE FÓSFORO



(A.1)

(A.2)

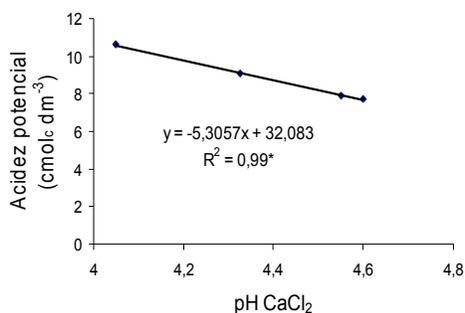


(A.3)

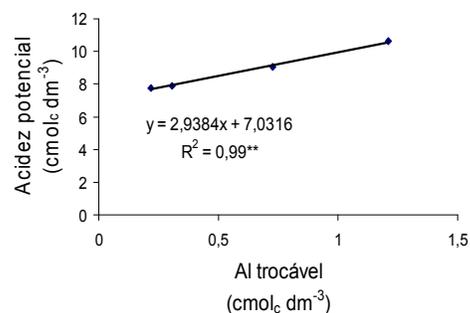
**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

Salientando os resultados que CLAPP et al., (1986) tornaram público, as correlações abaixo mostram que, com o aumento do pH a acidez potencial é diminuída proporcionalmente, o que também ocorreu quando da diminuição do Al trocável no solo. Isso significa que, uma diminuição do Al trocável ocasiona diminuição concomitante da acidez potencial do solo.

FIGURA 25 - (A.1) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub>; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ACIDEZ POTENCIAL EM FUNÇÃO DE ALUMÍNIO TROCÁVEL



(A.1)



(A.2)

GUEDES et al., (2006) trabalhando com Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, de textura média, verificaram que a aplicação de lodo de esgoto ocasionou decréscimo nos valores de H + Al, que se correlacionaram negativamente com pH CaCl<sub>2</sub>. Ainda verificaram que a acidez potencial, de 3,4 foi reduzida para 2,8 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> para uma dose de 10000 kg ha<sup>-1</sup> de lodo, podendo o fato dever-se à alcalinidade intrínseca do material (pH em média > 10) e em função da utilização de elevadas quantidades de óxidos de cálcio na fase de tratamento químico em estações de tratamento de esgoto (OLIVEIRA et al., 2002). Inúmeros trabalhos como o de SLOAN E BASTA (1995); SILVA et al., (1998); CHRISTIE et al., (2001) utilizaram as mais variadas taxas de aplicação de lodos de esgoto alcalinizados, ratificando os efeitos de biossólidos tratados de esgoto sobre o pH do solo, aumentando-o e, conseqüentemente, diminuindo Al trocável e a acidez potencial. Resultados contrários foram verificados quando VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> lodo base seca num Argissolo Amarelo promovendo diminuição no pH e conseqüente aumento de formas trocáveis de Al e acidez potencial do solo. Todavia, há que se salientar que o lodo de esgoto utilizado não era tratado alcalinamente e tinha pH alto. Este aumento nos teores de Al e H+Al estavam relacionados com a diminuição do pH do solo, fato que também foi evidenciado por correlações inversas altamente significativas entre os teores de Al e H+Al e os valores de pH do solo.

As melhores fontes de adição de P para esta variável de solo foram o FPA e o ST (Figura 24A.3 acima). Segundo NOVAIS e SMITH (1999) o efeito observado com o FPA, provavelmente, deve-se a granulometria farelada (Tabela 4) desta fonte de P, cuja parte não acidulada é de fácil dissolução nas condições ácidas encontradas neste Latossolo (Tabela 1). Também pode-se dever ao poder corretivo de sua parte não acidulada (BELTRÁN et al., 1998), que proporciona aumento do pH do solo, redução do  $Al^{3+}$  trocável e, conseqüentemente, da acidez potencial. Quanto ao ST, provavelmente, seu maior conteúdo maior de P solúvel deve ter levado à precipitação do nutriente com Al trocável da solução no solo (NOVAIS e SMITH, 1999) e conseqüente reposição pelo Al da fase sólida, resultando em redução da acidez potencial. Similarmente ao verificado para o Al trocável, verificou-se menor efeito na diminuição da acidez potencial para a fonte SS (Figura 24A.3). Este fato deveria se dar ao contrário, pois, consideráveis concentrações de sulfato de cálcio (gesso) são encontradas no super simples (cerca de 40%), que retira, por precipitação, parte do Al trocável da solução no solo. Conseqüentemente, haveria um deslocamento e reposição da forma trocável de Al da fase sólida para a solução no solo, o que determinaria sua redução neste Latossolo. De acordo com PITTA et al., (2007) o gesso ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ ) é empregado quando se exige a diminuição de concentrações tóxicas de alumínio trocável no solo. Resultados de OSZTOICS et al., (2005) indicaram acidificação do solo provocada pela aplicação de SS.

É importante notar-se que o efeito dos melhores tratamentos foi contrário ao verificado para o pH  $CaCl_2$ , indicando a proporcionalidade inversa entre estas variáveis de solo (Figura 25A.1 acima). Portanto, quando se observou aumento de níveis de adição, com conseqüente redução de quantidades de lodo alcalinizado puro nas misturas (Tabela 7), a acidez potencial tendeu a manter-se em valores pouco abaixo, porém, semelhantes ao original (Tabela 1). Os valores médios de acidez potencial verificados para a fonte SS foram maiores que para FPA e ST (Figura 24A.3 acima), porém, muito semelhantes. Este fato reforça a idéia de que maiores quantidades de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas de adição exerceram maior efeito sobre o pH  $CaCl_2$ , e conseqüentemente, sobre valores de  $Al^{3+}$  trocável e  $H + Al$  do solo.

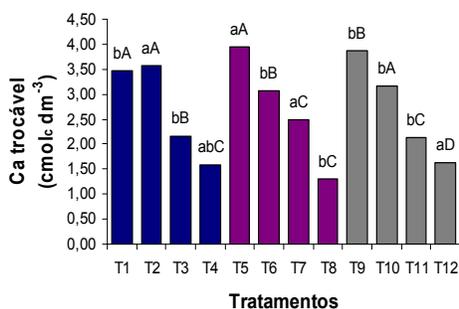
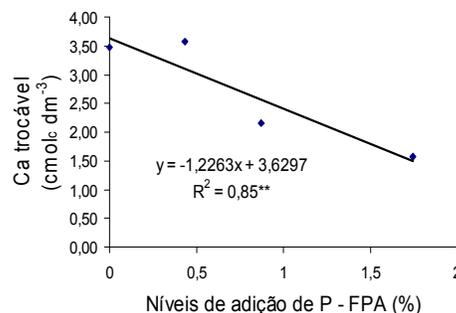
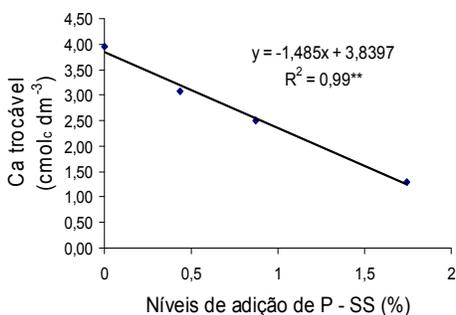
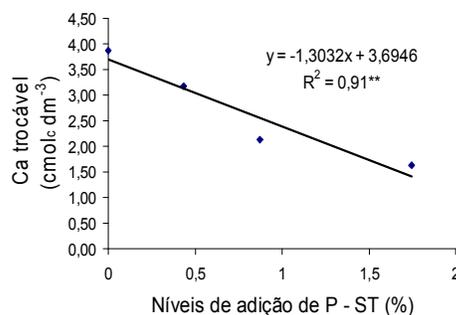
#### 4.2.1.4 Cálcio trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa ( $F_{<0,01}$ ) em relação ao cálcio trocável neste Latossolo (Apêndice 17). O fato indica a dependência de fatores entre si. Assim, para se obter o melhor nível de adição dever-se-á observar a fonte utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado que outros para esta variável.

A comparação de médias de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico consta na Figura 26A.1 e Apêndice 21. As concentrações de Ca trocável neste Latossolo, de maneira geral, foram maiores que as encontradas em Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR, o que pode ter ocorrido em função de sua maior CTC original e maior teor original do nutriente neste solo (Tabela 1) Possivelmente, a grande percentagem de Ca total presente nas fontes de P (CQFS - SC/RS, 2004; NOVAIS e SMITH, 1999) e no lodo (Tabela 3 e LOGAN e HARRISON, 1995) também cooperaram para com os resultados.

Altas correlações negativas foram verificadas para o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  trocável no solo em função de níveis de adição de P (tratamentos) a partir das fontes de P individuais (Figuras 26A.2, 26A.3, 26A.4), o que indica aumento de quantidades trocáveis do nutriente no solo em função de aumento de níveis de adição de P. As testemunhas e os tratamentos referentes aos níveis de 0,436% P proporcionaram os maiores aumentos de Ca trocável no solo. Este fato pode estar relacionado com a maior quantidade de lodo de esgoto alcalinizado puro nestes tratamentos (Tabela 7) que, aliada à alta concentração total de Ca (Tabela 3) presentes no lodo das testemunhas (LOGAN e HARRISON, 1995) e nível de 0,436% P a partir do FPA (SOCAL, 2006; SBCS-NRS, 2004) e sua forma farelada mais favorável à dissolução nas condições ácidas encontradas neste Latossolo (Tabela 1) devem ter proporcionado a elevação do teor trocável deste nutriente no solo.

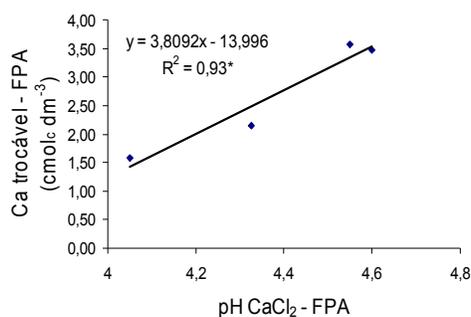
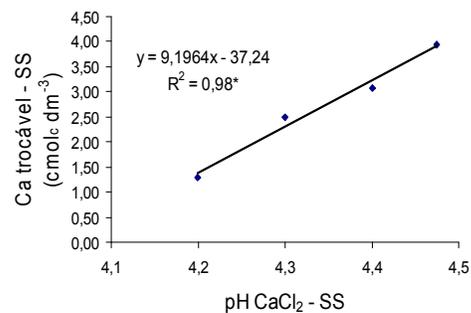
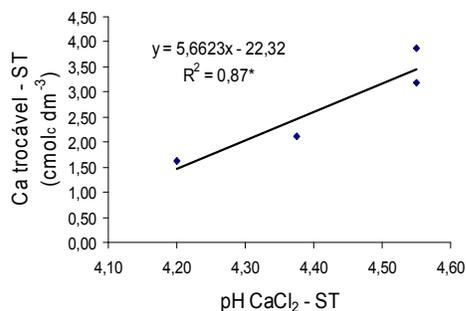
FIGURA 26 - **(A.1)** CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST

**(A.1)****(A.2)****(A.3)****(A.4)**

T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA  
 T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS  
 T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

FIGURA 27 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub> EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub> EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (SS); **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE CÁLCIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE pH CaCl<sub>2</sub> EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLA (ST)

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

Ca trocável - FPA = Cálcio trocável verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de FPA

pH CaCl<sub>2</sub> - FPA = pH CaCl<sub>2</sub> verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de FPA

Ca trocável - SS = Cálcio trocável verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de SS

pH CaCl<sub>2</sub> - SS = pH CaCl<sub>2</sub> verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de SS

Ca trocável - ST = Cálcio trocável verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de ST

pH CaCl<sub>2</sub> - ST = pH CaCl<sub>2</sub> verificado em LVAdt fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de ST.

As Figuras 27A.1, 27A2 e 27A.3 acima denotam altas correlações positivas verificadas para Ca trocável no solo em função do pH  $\text{CaCl}_2$  em relação às fontes individuais, ratificando que, um aumento no pH do solo ocasiona aumento concomitante dos teores trocáveis de Ca. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram doses de 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo em Argissolo amarelo e mesmo com cerca de 2,2% deste elemento na massa seca do lodo o teor de Ca no solo não sofreu influência. O Ca trocável também foi avaliado no trabalho de SILVA, BOARETTO e BERTON (2001), no qual aplicaram doses de 0, 20 e 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto, na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Verificaram que o Ca contido no lodo e o contido no superfosfato triplo levaram a grande aumento do Ca trocável do solo que, em relação à testemunha, foi até quatro vezes maior aos 146 dias, e oito vezes aos 272 dias do tratamento, quando empregada a maior dose do lodo. STEHOUWER e MACNEAL (2004) verificaram que um solo argiloso quando tratado com doses de 9, 18 e 36  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto alcalinizado e suplemento com fertilizantes inorgânicos adicionados aos tratamentos teve seus teores de Ca aumentados concomitantemente ao aumento de doses de lodo. Estudando um Latossolo Vermelho eutroférico, BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002b) concluíram que dentre as variáveis de solo afetados pela adição de 36  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de lodo de esgoto alcalinizado está o  $\text{Ca}^{2+}$ , que teve seus teores aumentados em função das doses aplicadas. De acordo com análise conjunta do efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto caleado sobre os componentes acidez do solo, que inclui o  $\text{Ca}^{2+}$ , o  $\text{Al}^{3+}$  e pH, GUEDES et al., (2006) mostraram que a influência ocorre a partir da dose de 40  $\text{Mg ha}^{-1}$ , exceto nesta mesma dose aplicada superficialmente, que não foi diferente das menores doses (10 e 20  $\text{Mg ha}^{-1}$ ), do tratamento-controle e adubação mineral. Analisando um segundo componente, que inclui o  $\text{Ca}^{2+}$ , P, C,  $\text{Mg}^{2+}$ , SB e CTC do solo, indicaram que essas variáveis apresentam o mesmo comportamento conforme os tratamentos aplicados, podendo ser interpretado como um fator mais relacionado com a fertilidade e massa orgânica do solo. Estes mesmos autores encontraram correlação muito forte entre o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  no solo e a soma de bases e concluíram que o valor da soma de bases é, praticamente, determinado pelo  $\text{Ca}^{2+}$ . Neste mesmo trabalho ficou indicado que “o teor de  $\text{Ca}^{2+}$  aumentou com as doses de biossólido até uma aplicação de 80  $\text{Mg ha}^{-1}$

e não houve diferenças significativas entre os tratamentos numa dose referência de  $40 \text{ Mg ha}^{-1}$  nem entre as doses de  $80$  e  $160 \text{ Mg ha}^{-1}$ , o que pode ter ocorrido em função de saturação do complexo de troca por esse elemento”. SOUMARE, TACK e VERLOO (2003) verificaram aumentos significativos no teor de cálcio em experimento em vasos com dois solos agrícolas da Malásia tratados com um controle não fertilizado, NPK, NPK +  $25 \text{ Mg ha}^{-1}$  de composto de resíduo sólido municipal, NPK +  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$ , NPK +  $100 \text{ Mg ha}^{-1}$ , PK +  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$ , NP +  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$ , P +  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$  de composto de resíduo sólido municipal, e  $50 \text{ Mg ha}^{-1}$  de composto somente.

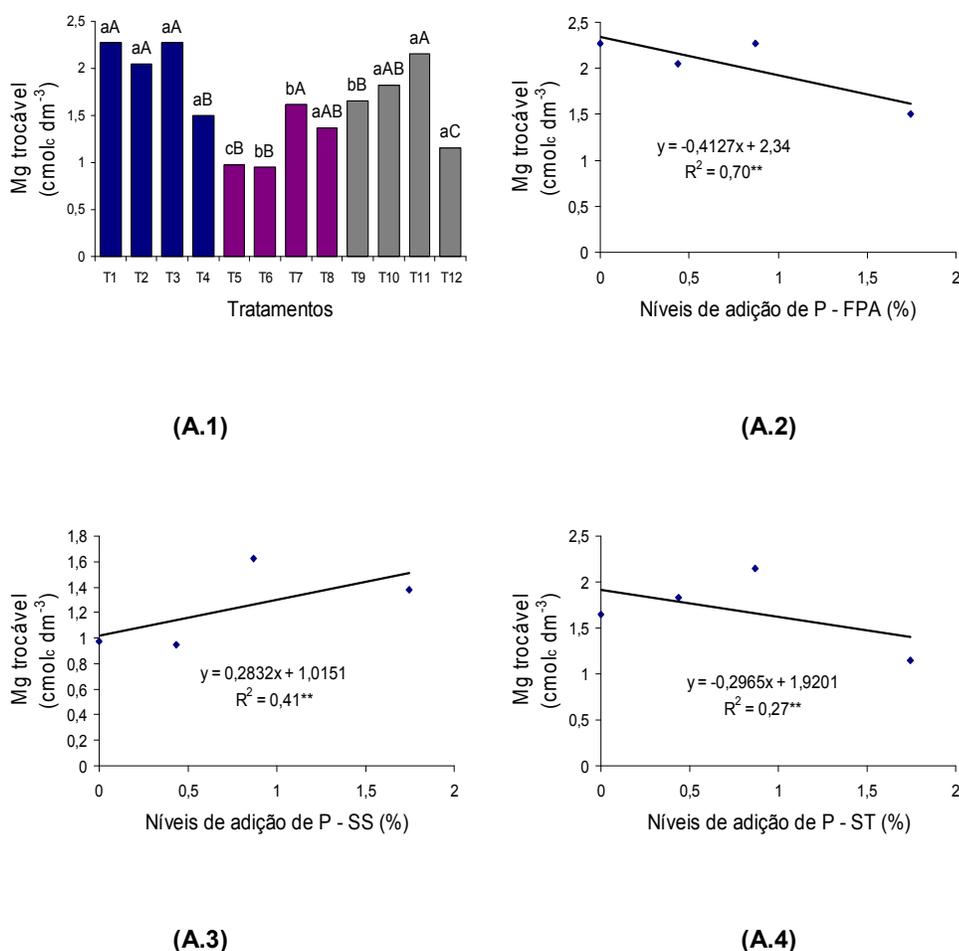
#### 4.2.1.5 Magnésio trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com P foi significativa ( $F_{<0,01}$ ) para o magnésio trocável em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 17), mostrando-se dependentes entre si. Assim, para se obter o melhor nível de adição dever-se-á observar a fonte utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado para esta variável de solo.

A comparação de médias de magnésio trocável no solo (Figura 28A.1 e Apêndice 22) indica que todos tratamentos aumentaram as concentrações trocáveis de Mg neste Latossolo. Dentre as correlações verificadas a mais estreita foi entre Mg trocável em função de níveis de adição a partir de FPA (Figuras 28A.2, 28A.3 e 28A.4). Porém, as testemunhas específicas (0% P) e níveis de 0,436% e 0,872% P a partir de FPA e ST foram estatisticamente iguais entre si e superiores ao SS para esta variável de solo. Os menores níveis de adição de P a partir do SS deveriam apresentar valores de Mg trocável semelhantes aos mesmos tratamentos a partir de FPA e ST. Isso não se verificou possivelmente em função de erro durante análise química das amostras relacionadas a estes tratamentos. Todos os níveis de adição de P considerados estatisticamente superiores possuem teor elevado de Mg

presente nas quantidades de lodo alcalinizado puro das misturas de adição de P (Tabela 7) (LOGAN e HARRISON, 1995 e Tabela 3).

FIGURA 28 - (A.1) MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

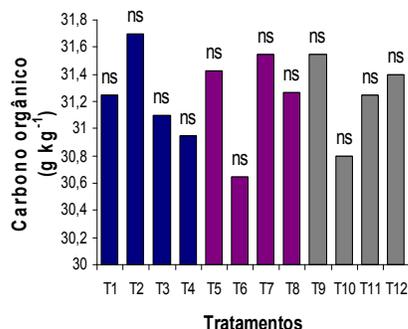
SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) aplicaram doses de 0, 20 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Observaram que o Mg trocável teve participação nos aumentos da soma de bases no solo. Estes mesmos autores no ano de 1995, verificaram aumento dos teores trocáveis de Mg, o que contribuiu para o aumento da saturação por bases do solo. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) incorporaram ao solo 135,5 kg ha<sup>-1</sup> de Mg a partir de dose de 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto. Os teores deste nutriente foi inferior ao encontrado no solo que não recebeu adubação com lodo o que sugeriram estar associado à lixiviação, uma vez que cátions como Al<sup>+3</sup> e H<sup>+</sup> podem deslocá-lo dos sítios de adsorção para a solução do solo, tornando-o passível de percolação às camadas mais profundas do solo. SIMONETE et al., (2003) aplicaram doses de 0, 16,05, 32,10, 48,15, 64,20 e 80,25 g vaso<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, respectivamente 0, 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha<sup>-1</sup> base seca a um Argissolo Vermelho-Amarelo em Casa de vegetação. Observaram aumento no teor trocável de Mg com a aplicação de lodo de esgoto no solo e um aumento proporcional na soma de bases do solo. Numericamente, a cada dose de lodo de esgoto aplicada houve aumento de 0,01 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no teor de Mg, que teve participação no aumento verificado na soma de bases, a cada dose aplicada do resíduo.

#### 4.2.1.6 Carbono orgânico em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte, assim como os fatores isolados nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foram estatisticamente significativos para o carbono orgânico do solo (Figura 29 e Apêndice 17). Os valores observados estiveram levemente abaixo, porém, muito semelhantes ao teor original do solo. Os valores de carbono orgânico neste Latossolo de Contenda - PR mantiveram-se superiores aos observados para o Latossolo de Arapoti - PR. Este fato ocorreu possivelmente em função do maior teor original neste solo. O pequeno decréscimo nas quantidades de carbono orgânico observadas para aquele Latossolo repetiram

se neste experimento, o que pode estar ratificando a baixa precisão do método utilizado para análise de carbono no solo (Walkley e Black).

FIGURA 29 - CARBONO ORGÂNICO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)



T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** ns = não significativo (Tukey  $P > 0,05$ ).

#### 4.2.1.7 Fósforo extraível Mehlich-1 em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi significativa ( $F_{<0,01}$ ) para o P extraível Mehlich-1 em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 17), o que denota uma dependência entre fatores. Dessa forma, para se obter o melhor nível de adição dever-se-á observar a fonte de fósforo utilizada. Ou seja, para diferentes fontes há, pelo menos, um nível mais adequado que outros para esta variável de solo.

À semelhança do experimento com Latossolo Vermelho distrófico de Arapotipr, todos os tratamentos, inclusive as testemunhas, proporcionaram aumentos do P extraível Mehlich-1 no solo em relação ao teor original (Tabela 1). De maneira geral,

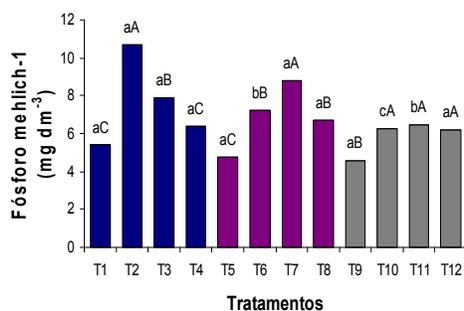
os valores verificados estão sensivelmente acima dos observados para o LVdt, o que provavelmente, deve-se ao maior teor original de P no solo (Tabela 1). Segundo a CQFS-SC/RS (2004) “a baixa capacidade de extração de P pelo extrator de mehlich-1 em solos que contêm altos teores de argila e, conseqüentemente, altos teores de óxidos de Fe e Al, capazes de indisponibilizar o P”, devem ter exercido influência sobre os resultados. A comparação de médias de P no solo indica que os tratamentos relativos aos níveis de 0,436% a partir de FPA = 10,725 mg dm<sup>-3</sup>, e 0,872% P de SS = 8,775 mg dm<sup>-3</sup> foram estatisticamente superiores aos demais tratamentos de mesma fonte e às suas testemunhas específicas (0% P) para o P extraível do solo (Figura 30A.1 e Apêndice 23). Os teores de P extraível obtidos a partir de FPA e o SS estão adequados, respectivamente, nos níveis muito alto e médio para a cultura do feijoeiro, segundo FAGERIA, BARBOSA FILHO e STONE (2004), variando de baixo para todas as testemunhas a alto para os melhores tratamentos, segundo CQFS-SC/RS (2004). Estes resultados ajustaram-se a modelos quadráticos observados nas Figuras 30A.2, 30A.3 e 30A.4, o que indica que, para as fontes de adição FPA ( $R^2 = 0,5382^{**}$ ), SS ( $R^2 = 0,9338^{**}$ ) e ST ( $R^2 = 0,9368^{**}$ ), o P extraível neste Latossolo, tende a diminuir com o aumento de níveis de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado.

Os seguintes fatores podem ter corroborado com estes resultados:

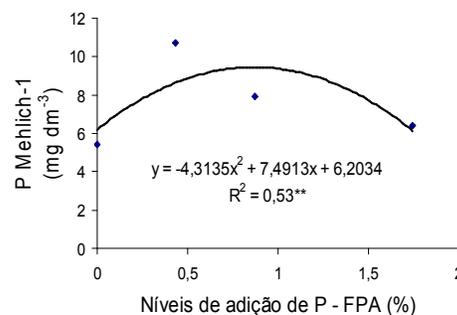
a) a concentração de P solúvel em água do FPA, uma forma de P prontamente disponível na solução do solo (Tabela 4). Segundo a CQFS-SC/RS (2004) e legislação pertinente, fosfatos parcialmente acidulados possuem, no mínimo, 5% do P total solúvel em água e 9% solúvel em CNA + água, o que pode elevar rapidamente o P extraível no solo (NOVAIS e SMITH, 1999);

b) a granulometria farelada do FPA cuja parte não acidulada pode ter sido dissolvida em função da condição ácida original do solo (Tabela 1). A parte não acidulada terá a liberação do P condicionada à origem da rocha que serviu de matéria prima (NOVAIS e SMITH, 1999), neste caso, a fosforita alvorada reativa. Estes mesmos autores salientam que o fosfato alvorada, finamente moído, terá maior contato com o solo e maior solubilização da fração solúvel;

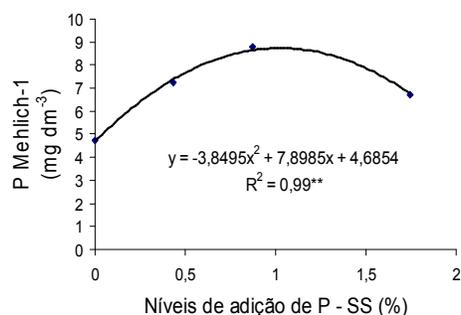
FIGURA 30 - (A.1) FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



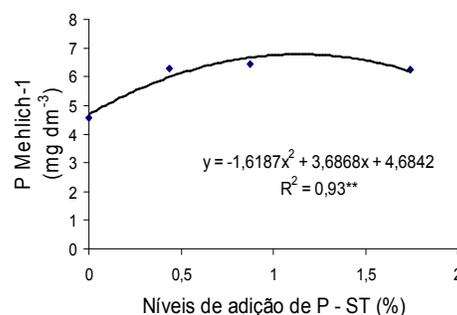
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

c) as maiores doses de lodo de esgoto alcalinizado puro presentes nas misturas referentes aos níveis de 0,436% de adição (Tabelas 6 e 7), que possuem

cerca de 0,151% P total em sua constituição química original (Tabela 3). Neste experimento, provavelmente, houve mineralização de matéria orgânica do lodo nas misturas de adição e, conseqüentemente, liberação de parte do P orgânico nele presente, aumentando sua disponibilidade. Deste total de P, cerca de 50% estará disponível às plantas já no primeiro ano de aplicação (SANEPAR, 1997). Segundo SHARPLEY (1985) o P orgânico constitui de 20-80% do total de P de solos minerais e contribui significativamente para a nutrição das plantas. Segundo MAZZARINO et al., (1998) a liberação de P do biossólido depende, primeiramente, do tipo de solo e, em segundo lugar, da origem do composto.

SILVA et al., (2002) salientaram que, de modo geral, a aplicação de lodo de esgoto ao solo tem propiciado elevação de teores de fósforo e a eficiência de lodo de esgoto por eles verificada foi 25 % superior à do superfosfato triplo como fonte de fósforo para o milho. GUEDES et al., (2001) encontrou que teores de P extraível no solo que recebeu dose de 10 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo foi significativamente maior do que no solo do tratamento testemunha, sem lodo. Para HUE (1995) “além de ser fonte de P, o lodo pode diminuir a adsorção de P no solo em função da matéria orgânica, que poderá fornecer íons orgânicos que competem com o fosfato pelos sítios de adsorção”, aumentando sua disponibilidade. IYAMUREMYE e DICK (1996) relataram que a adição de materiais orgânicos aos solos podem aumentar significativamente a disponibilidade de P no solo e diminuir a capacidade de adsorção de P do solo. HAYNES e MOKOLOBATE (2001) propuseram um modelo conceitual de redução de adsorção de P a partir da decomposição de resíduos orgânicos no solo, aumentando sua disponibilidade (Figura 3);

d) a concentração de P solúvel presente no SS. Neste caso, valor abaixo de legislação (tabela 4). Segundo CQFS-SC/RS (2004) esta fonte de P apresenta, no mínimo, 16% de P solúvel em água. Sua forma granulada permite menos contato com o solo e, conseqüentemente, menor fixação de P no solo. Essa granulometria também é mais favorável à maior dispersão do fertilizante no volume de solo, o que pode tornar o P mais acessível à amostragem do solo par fins de análise;

e) as quantidades médias de lodo alcalinizado puro no tratamento relativo ao nível de adição de 0,872% P a partir de SS (aproximadamente a metade de lodo em relação ao nível de 0,436% P). Todavia, a liberação do P orgânico do lodo aliada às quantidades significativas de P solúvel nesta fonte de adição devem ter elevado o

teor de P neste latossolo, a partir deste tratamento. Cabe salientar aqui que, as maiores doses de lodo puro nas misturas de níveis menores de adição (0,436% P) correspondem a doses intermediárias de lodo em relação às altas doses necessárias ao suprimento integral de P às plantas. MELO et al., (1997), salientaram ainda a existência de dúvidas sobre o potencial de lodo de esgoto em aumentar a disponibilidade de P no solo. No entanto, NASCIMENTO et al., (2006) obtiveram aumentos significativos nos teores de P disponível a partir de doses crescentes de lodo de esgoto, obtendo duplicação de teores originais presentes no solo para uma dose elevada de 60 Mg ha<sup>-1</sup>. Resultados semelhantes foram averiguados por BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002). Todavia, verificou-se também que, mesmo para esta dose, os teores de P disponíveis no solo ainda foram baixos, a partir do que, sugeriu doses elevadas de lodo, ou suplementação com fertilizantes minerais, para obtenção de altas produtividades das culturas. Nas presentes condições experimentais, os melhores tratamentos possuem diferentes doses puras de lodo alcalinizado nas misturas de adição. Assim, os resultados ora obtidos podem estar indicando que tanto doses baixas quanto intermediárias de lodo podem ser utilizadas em mistura com P, sem detrimento da disponibilidade de P às plantas. VENÂNCIO GOMES et al., (2005) aplicaram 0; 7,7; 15,4; 29,7; 45,1 e 60,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto em Argissolo Amarelo e verificaram aumento linear do teor de P na camada superficial do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por CRUZ et al., (2002), que estudando a fertilidade de um solo fertilizado com lodo de esgoto, observaram incrementos de teores de P no solo, mostrando-se os tratamentos com o biossólido superiores à adubação mineral.

O contrário dos resultados acima apresentados era esperado e a disponibilidade de fósforo deveria ser diminuída no solo em função da presença de doses maiores de lodo de esgoto puro, de reação alcalina, presentes nas misturas de adição de P. Segundo LUCCHESI et al., (2004) os materiais alcalinos utilizados para o tratamento deste biossólido geram um ambiente de alto pH e conteúdo de cálcio. Dessa forma, menores concentrações de P extraível deveriam ser encontradas para os níveis menores e intermediários de adição de P (0,436% e 0,872% P) dada a provável precipitação de P oriundo de fontes solúveis com o Ca de lodos de esgoto alcalinizados. No entanto, mesmo a partir de ST observou-se aumento de P extraível Mehlich-1 no solo para os níveis de 0,436% e 0,872% P em

relação ao maior nível de adição, às suas testemunhas específicas (Figura 30A.1) e ao teor original de P no solo (Tabela 1).

Não houve correlação entre P extraível Mehlich-1 e pH  $\text{CaCl}_2$ . O fato pode estar denotando que as variações de pH do solo observadas para os tratamentos referentes às testemunhas e aos níveis de 0,436% P (Figura 22 A.1) podem não ter exercido influência sobre os aumentos de teores de P no solo. Também não houve correlação entre Al trocável em função do P extraível no solo. O fato indica que o aumento da disponibilidade de P em relação às testemunhas não foi devido à diminuição do Al em solução (Figura 28A.1) a partir dos tratamentos referentes aos menores níveis de adição de P (0,436% P). Cabe salientar-se ainda que, os teores de P extraível no solo a partir dos melhores tratamentos neste experimento foram sensivelmente maiores que os valores observados no experimento com Latossolo Vermelho distrófico. Este fato pode dever-se ao maior teor original de P neste Latossolo (Tabela 1), a despeito da maior capacidade de fixação de P dado o seu maior teor de argila (NOVAIS e SMITH, 1999; VALLADARES, PEREIRA e ANJOS, 2003).

SILVA, BOARETTO e BERTON (2001) aplicaram doses de 0, 20 e 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto, na presença ou não de fertilizantes minerais num Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura arenosa/média. Com a “aplicação de 66  $\text{kg ha}^{-1}$  de P, contido em 20  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto alcalinizado, o nível de suficiência de P no solo saiu de muito baixo para médio. A aplicação de 40  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo o teor de P do solo aumentou ainda mais, mas sem mudar a classe de teor já atingida com a dose de 20  $\text{Mg ha}^{-1}$ ”. LINDSAY e LOGAN (1998) aplicaram taxas de 0; 7,5; 15; 30; 60; 90; 120; 150; 188; 225 e 300  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto alcalinizado em um solo silto-argiloso de Miami e demonstraram inúmeros benefícios de lodo de esgoto para espécies cultivadas e para algumas características químicas do solo.

VIEIRA et al., (2005) trataram um Latossolo Vermelho distroférrico, textura areia/argilosa (EMBRAPA, 1999) e cultivaram soja com dose zero de lodo de esgoto; soja com 1,5  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto; soja com 3  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto; soja 6  $\text{Mg ha}^{-1}$  de lodo de esgoto e soja com adubação química. Os teores de P no solo no primeiro ano de cultivo numa primeira avaliação, foram maiores nos tratamentos com lodo. Estes autores também verificaram que, na análise de solo antes da semeadura da soja, no segundo ano de cultivo, os teores de P nos solos que

receberam lodo foram em média 23% e 45% maiores do que a média dos tratamentos testemunha. STEHOUWER e MACNEAL (2004) aplicaram doses semelhantes às praticadas neste experimento de 9, 18 e 36 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo alcalinizado. Fosfato monocálcico (CaHPO<sub>4</sub>) foi adicionado aos tratamentos na quantidade equivalente do nutriente que seria suprido pelo lodo. Todos os tratamentos aumentaram os teores de P no solo.

Muito embora as mudanças no pH do solo tenham sido menos de 1 unidade, são importantes neste contexto, já que se tem bem estabelecido o efeito do aumento do pH sobre o aumento da disponibilidade de P no solo. WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) trataram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação com 0, 25, 50 e 75 kg P ha<sup>-1</sup>, combinados ou não com resíduo de galinheiro, resíduo de curral, palha de milho e composto na dose de 2 Mg ha<sup>-1</sup> peso seco. O P extraível aumentou linearmente com o aumento das doses de P a partir da rocha fosfatada de Minjingu tanto para amostras coletadas a 4 quanto as coletadas a nove semanas do estabelecimento dos tratamentos. Os efeitos da combinação de materiais orgânicos com a rocha fosfatada foram variáveis. Porém, a combinação de esterco de galinheiro + rocha proporcionou mais P extraído em ambos tempos de coleta. Estes mesmos autores, em estudos de campo, trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxa de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada de Minjingu. Os valores de P extraível obtidos com a aplicação de ambos, materiais orgânicos e P, em geral, foram muito baixos. No entanto, a quantidade de P extraível com a aplicação de P desta rocha aumentou. No tratamento controle do solo da localidade de Busia, no Kenya, o P extraível aumentou de 1,96 mg kg<sup>-1</sup> de solo da primeira estação de cultivo de milho para 3,47 mg kg<sup>-1</sup> numa segunda estação. No tratamento com 60 kg P ha<sup>-1</sup> aumentou de 3,30 mg P kg<sup>-1</sup> na primeira estação para 5,01 mg P kg<sup>-1</sup> na segunda estação. Na localidade de Siaya os valores correspondentes foram: 1,6 para 99 mg P kg<sup>-1</sup> de solo no tratamento controle e de 3,5 para 4,12 mg P kg<sup>-1</sup> de solo na parcela que recebeu 60 kg P ha<sup>-1</sup>. As amostras coletadas a diferentes intervalos mostraram que o P extraível aumentou desde que os tratamentos foram aplicados. Este fato foi mais pronunciado nas parcelas que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> tanto para a rocha sozinha ou em combinação com 2 Mg ha<sup>-1</sup>

de esterco de curral e restos culturais de milho. BARBOSA, TAVARES FILHO e FONSECA (2002b) verificaram aumento nos teores de P disponível em relação ao teor inicial no solo somente com dose acima de 24 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto caledo,. Resultados semelhantes foram obtidos por SILVA et al., (1998) e ANDREOLLI (1999). Segundo McLEAN e WHEELER (1964)<sup>16</sup> citados por ZAPATA e ZAHARAH (2002) a hidrólise ácida da parte solúvel de fosfatos naturais parcialmente acidulados provê P disponível extra para utilização das plantas. SOUMARE, TACK e VERLOO (2003) conduziram experimento em vasos onde cultivaram o azevém em dois solos ácidos fertilizados com NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto de resíduo sólido municipal, NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup>, NPK + 100 Mg ha<sup>-1</sup>, PK + 50 Mg ha<sup>-1</sup>, NP + 50 Mg ha<sup>-1</sup>, P + 50 Mg ha<sup>-1</sup> e 50 Mg ha<sup>-1</sup> do composto somente, e verificaram aumentos P disponível em todos os tratamentos que receberam composto.

#### 4.2.1.8 Fósforo extraível Mehlich-1 e Resina trocadora de íons em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis de fósforo de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

Assim como para o Latossolo Vermelho distrófico, de Arapoti-PR, uma análise de variância foi feita a partir dos resultados de P extraível neste Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado com P. Para isso tomou-se os tratamentos referentes aos níveis de 0% (testemunha), 0,436%, 0,872% e 1,745% P a partir de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada e analisou-se o solo para P extraído pelos extratores de Mehlich-1 e resina trocadora de íons. Assim, 4 níveis de adição de P vs. 2 extratores de P geraram 8 tratamentos com 4 repetições. Foi verificada homogeneidade de variâncias para estas variáveis de solo e não foram requeridas transformações de dados. A análise

---

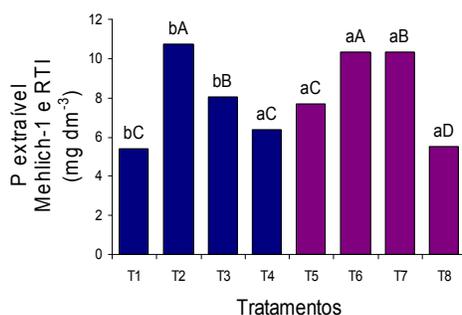
<sup>16</sup> MCLEAN, E. O., WHEELER, R. W. C. **Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants. I. Growth chamber studies.** Soil Science of America Proceedings, v. 28, p. 545–550, 1964.

de variância de P extraível Mehlich-1 e Resina trocadora de íons encontram-se no Apêndice 24.

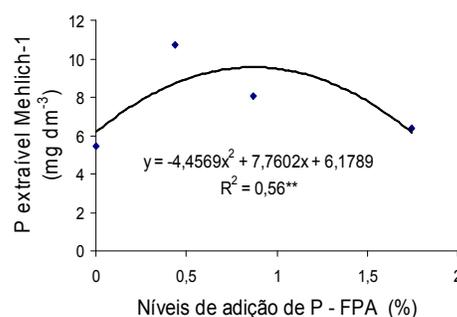
A interação nível de adição de P e extrator de P mostrou-se estatisticamente significativa para o P extraível ( $F_{<0,01}$ ) em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Assim, para se obter o melhor nível de adição de P dever-se-á observar o extrator utilizado. Assim, existe pelo menos, um nível de adição e um extrator mais adequado para esta variável química de solo.

Todos os tratamentos aumentaram os teores de P no solo em relação à testemunha. Os níveis de 0,436% e 0,872% P a partir do FPA aumentaram os teores de P extraível do solo com ambos extratores em relação à testemunha e ao teor original do solo (Tabela 1). A comparação de médias de P extraível neste latossolo (Figura 31A.1 e Apêndice 25) indica que a resina trocadora de íons foi estatisticamente superior ao extrator de mehlich-1 para a maioria dos tratamentos, com exceção do nível de 1,745% P, onde se observou igualdade estatística entre extratores. Porém, tanto para a resina ( $12,325 \text{ mg dm}^{-3}$ ) quanto para o extrator de Mehlich-1 ( $10,725 \text{ mg dm}^{-3}$ ) o tratamento relativo ao nível de 0,436% P foi superior à testemunha e aos demais níveis de adição de P a partir desta fonte. Note-se que os valores para estes tratamentos são próximos numericamente. Os valores maiores de P resina podem dever-se ao P solúvel da parte não acidulada do fosfato alvorada, podendo os resultados terem sido superestimados pelo extrator de Mehlich-1 em função de sua parte não acidulada (fosforita alvorada). As Figuras 31A.2 e 31A.3 acima mostram correlações quadráticas entre P extraível Mehlich-1 em função de níveis de adição de P de FPA ( $R^2 = 0,56^{**}$ ) e P extraível RTI em função de níveis de adição de mesma fonte ( $R^2 = 0,99^{**}$ ). Este fato pode estar indicando coerência entre resultados de P extraível entre os extratores, o que pode, também, ser ratificado pela correlação existente entre ambos extratores de P (Figura 31A.4). De acordo com MIRANDA et al., (2002) que trabalharam com solos argilosos, existe uma correlação alta e significativa entre métodos, o que indica que, embora

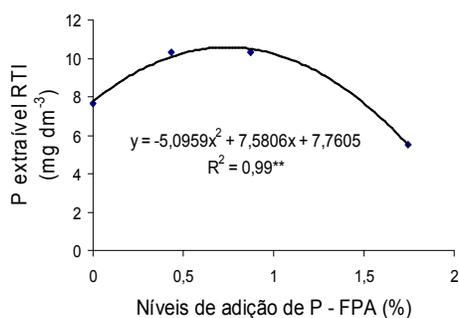
FIGURA 31 - **(A.1)** FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL RESINA TROCADORA DE ÍONS EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE UM FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL RESINA TROCADORA DE ÍONS EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1



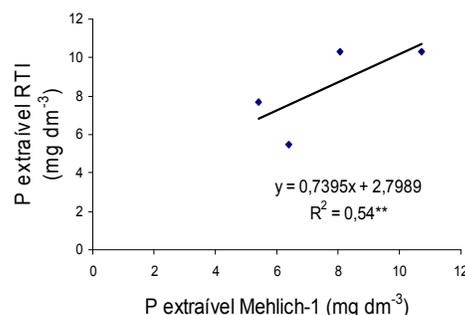
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

T1 a T8 = tratamentos resultantes de combinação de 4 níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado e 2 extratores de P

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado e minúsculas aos extratores de P na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

extraíndo-se quantidades diferentes de P, os extratores guardam a mesma proporção e variabilidade entre si semelhante para amostras com diferentes teores de P. Também foi verificada correlação entre P extraível Mehlich-1 e resina aniônica. Entretanto, tais resultados são análogos aos comumente encontrados na literatura, o que provavelmente se deve ao teor de P solúvel no FA e à reatividade intrínseca de sua parte não acidulada, que deve ter-se dissolvido em função da acidez original deste Latossolo (NOVAIS e SMITH, 1999). Segundo SHELTON e COLEMAN (1968)<sup>17</sup>, citados por MOREIRA et al., (2002) o extrator de Mehlich-1 apresenta ação preferencial na dissolução de fosfatos de cálcio, o que deve ratificar a conjectura de que os valores de P extraível por este extrator estão superestimados, ainda que inferiores ao P extraível pela resina de troca iônica.

NAKAYAMA et al., (1998) cultivou arroz num Latossolo Vermelho-Amarelo Álico tratado com superfosfato, termofosfato magnésiano, fosfato de Araxá e Fosfato de Gafsa. Os resultados mostraram elevados teores de P extraível no solo nos tratamentos que receberam fosfato natural de Araxá, principalmente em dose mais elevada (150 mg dm<sup>-3</sup>). Valores inferiores aos obtidos com esta fonte foram verificados pelo mesmo extrator quando se aplicou termofosfato e fosfato de Gafsa, que são rochas mais reativas no solo. Estes autores também constataram baixo índice de correlação entre extração de P pela planta e o teor no solo indicado pelo extrator de Mehlich-1, apontando-o como inadequado quando se utiliza fosfatos naturais e que, a resina trocadora de íons expressa melhor os teores de P do solo em comparação com extrator de Mehlich-1, principalmente quando uma fonte fosfatada insolúvel em água é aplicada. MOREIRA et al., (2002) trabalhando com fosfatos naturais de Carolina do norte e Arad para suprir P à centrosema cultivada em um Latossolo Amarelo distrófico, obteve maior taxa de recuperação de P Mehlich-1 com os fosfatos naturais seguido da resina. Ao contrário disso, verificou que o extrator resina apresentou maior capacidade de recuperação do P adicionado do que o extratores Mehlich-1 na cultura da alfafa. Segundo MUZZILI (1982) altos teores de P extraído pelo Mehlich-1 em solo tratado com fosfatos naturais, sem que

---

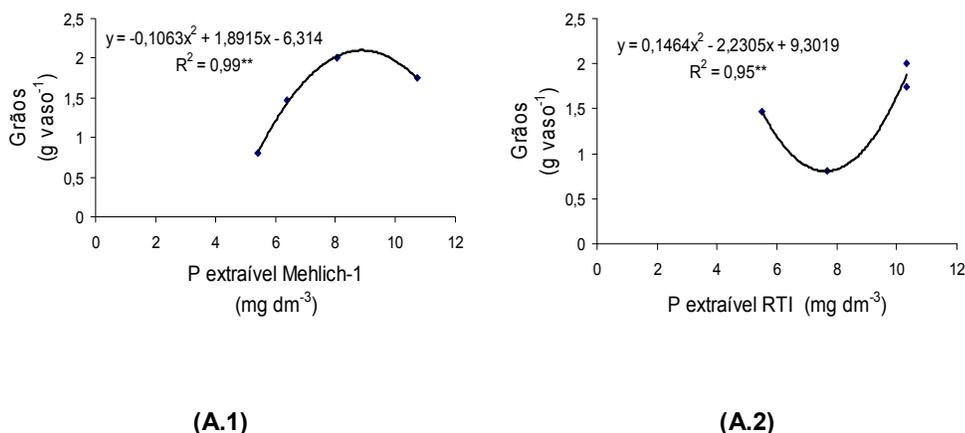
<sup>17</sup> SHELTON, J. E.; COLEMAN, N. T. **Inorganic phosphorus fractions and their relationships to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils.** Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v. 32, p. 91-94, 1968.

ocorresse elevada eficiência de uso deste nutriente pelas culturas testadas. RAIJ (1978) salienta que a resina retira somente as formas solúveis e lábeis de P e não superestima a quantidade de P disponível para as plantas. Assim, é caracterizada como um extrator acidulado que simula as raízes de vegetais na absorção de P do solo. Seu pH ligeiramente abaixo de 7,0 proporciona extração de P ligado tanto a cálcio como a ferro e alumínio, que são formas não disponíveis de P no solo. Este fato leva à conjectura de que os valores de P resina também podem estar superestimados. MIRANDA et al., (2002), trabalhando com solos argilosos, verificaram que o método da resina trocadora de íons extraiu mais P que o Mehlich-1. Segundo RAIJ, QUAGGIO e SILVA (1986) o extrator de mehlich-1 pode apresentar baixa capacidade de extração em solos argilosos e, em solos com menor teor de argila este método tem sido superior ao método da resina em trabalhos de vários autores, sendo encontradas as maiores quantidades extraídas em solos com menor teor de argila. PAVAN e CHAVES (1996), trabalhando em Latossolo Vermelho Distroférico (LVdt) muito argiloso de argila, sob café adensado, verificaram maior eficiência do extrator Mehlich-1, quando comparado ao extrator de resina. ROSSI et al. (1999) trataram um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, de textura média com superfosfato triplo, o termofosfato Yoorin, o fosfato de Carolina do Norte e o fosfato de Arad. Os resultados indicaram que os extratores Mehlich-1e resina trocadora de íons foram semelhantes na extração de fósforo. PÉREZ et al., (2003) obtiveram alta correlação entre os dois extratores, trabalhando com de cana-de-açúcar em um solo originado de cinzas vulcânicas, com baixo teor de P e alta capacidade de adsorção do nutriente.

O fato de o método de extração de P com a resina aniônica exigir longo tempo de agitação em comparação com o Mehlich-1 também deve ter corroborado com os resultados aqui obtidos (SILVA, 1999).

Altas correlações quadráticas foram verificadas entre produção de grãos em função de P extraível Mehlich-1 (Figura 32A.1) e produção de grãos em função de P extraível RTI (Figura 32A.2). Este fato pode estar denotando coerência de valores de P extraível por ambos os extratores, P acumulado uma vez que guardam a mesma proporção e variabilidade entre si para os diferentes níveis de adição de P. Na literatura, é notória a necessidade de relação entre P extraído e produção de grãos em programas de calibração de extratores de P.

FIGURA 32 - (A.1) CURVA DE TENDÊNCIA PARA PRODUÇÃO GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL RESINA TROCADORA DE ÍONS



#### 4.2.1.9 Percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para o conteúdo em percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro (Apêndice 17), o que indica independência destes fatores entre si. Também não houve significância estatística para a fonte de adição, ocorrendo significância somente para o fator nível de adição de P ( $F_{<0,01}$ ) para esta variável.

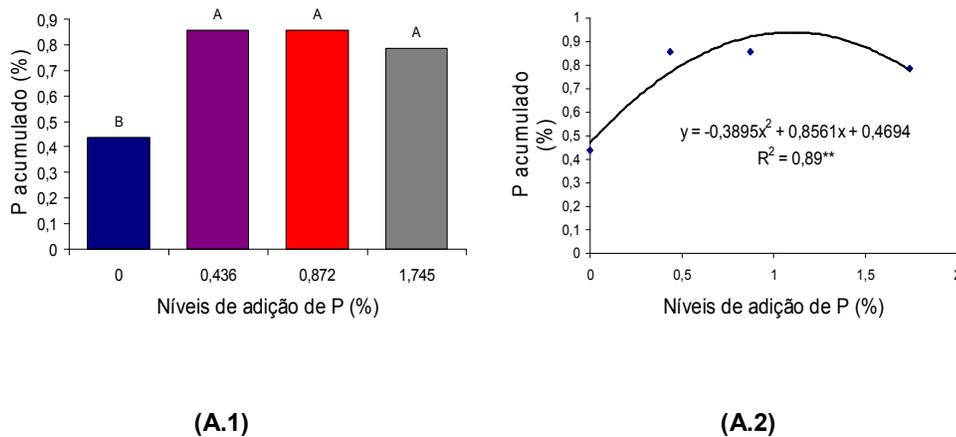
A comparação de médias indica que todos os tratamentos com P aumentaram a acumulação do nutriente na parte aérea de feijoeiro (Apêndice 26), mostrando-se estatisticamente iguais entre si e superiores à testemunha para esta variável neste latossolo (Figura 33A.1). A percentagem de P acumulado correlacionou-se negativamente com os níveis de adição de P, adequando-se ao modelo quadrático observado na Figura 33A.2. Este fato denota que a acumulação de P tende a aumentar da testemunha para os níveis de 0,436% e 0,872% P e, a partir daí decai

sensivelmente. Os teores de P na massa seca total da parte aérea de feijoeiro (dados não mostrados) estiveram acima das faixas adequadas comumente encontradas na literatura, refletindo-se na alta percentagem de fósforo acumulado na massa seca total da parte aérea produzida pelo feijoeiro.

Analogamente ao ocorrido para o Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR, estes resultados podem ser explicados pelos seguintes fatores:

a) o aumento do P extraível Mehlich-1 no solo em todos os tratamentos que continham P, a despeito da elevada acidez e conseqüente alta capacidade de fixação de P deste Latossolo (Tabela 1);

FIGURA 33 - (A.1) PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO



**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

b) as relações Ca total:Mg total, tanto no solo quanto no lodo, que estiveram próximos de 1,7:1,0 (Tabela 3). Valores estes, abaixo, porém próximos dos verificados adequados por HERNANDEZ e SILVEIRA, (1998), que obtiveram relações de 2:1 e 3:1 como mais propícias ao equilíbrio entre nutrientes e à maior absorção de P pelo milho. Estes autores observaram que, valores acima de 3:1 nessa relação causaram quedas no crescimento e na produção de milho em razão

do efeito antagônico do Ca na absorção de Mg e, conseqüentemente, na absorção de P, pois, o Mg é considerado um carregador de P na planta. Segundo MALAVOLTA (2006) a absorção do  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  é máxima quando o magnésio está disponível em concentrações adequadas na superfície de raízes;

GUEDES, et al., (2006) trabalhando com doses de 10, 20, 40, 80 e 160 Mg  $\text{ha}^{-1}$  de lodo alcalinizado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico ácido concluiu que a aplicação desta classe biossólido no solo propicia aumento de teores foliares de P em eucalipto. Os dados de teor de P na massa seca total da parte aérea (dados não mostrados, em  $\text{g kg}^{-1}$ ) para todos os tratamentos, mostraram-se abaixo das faixas adequadas encontradas na literatura, mesmo tendo sido aplicada uma dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  dentro da faixa adequada para o feijoeiro. Os resultados de P acumulado verificados no presente experimento foram análogos aos obtidos em Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR. Todavia, comparando-se as Figuras 13A.1 e 33A.1 (acima), observa-se, claramente, que os valores de P acumulado pelo feijoeiro neste Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, argiloso, foram inferiores aos verificados em Latossolo Vermelho distrófico, textura média, de Arapoti-PR. O fato pode ser explicado pela maior fixação de P neste Latossolo e conseqüente menor disponibilidade e absorção do nutriente pelas plantas. Segundo NOVAIS e SMITH (1999) os solos tropicais são muito intemperizados e, em função de seus teores elevados de argilas (Tabela 2) e, conseqüentemente, de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, além do pH ácido, possuem maior capacidade de fixação de P. BERTON, CAMARGO e VALADARES (1989) verificaram aumento na absorção e, conseqüentemente, da acumulação, de P pelas plantas de milho em função de doses de 40 e 80 Mg  $\text{ha}^{-1}$  de lodo de esgoto. KIKUTI et al., (2007) aplicou doses de 0, 100, 200 e 300  $\text{kg.ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  em Latossolo Vermelho distroférico típico, textura argilosa, de Lavras a partir de superfosfato triplo. Obtiveram-se ajustes de dados a um modelo quadrático crescente de doses de N sobre os teores de P nas folhas com pecíolos. Estes mesmos autores observaram que, à medida que aumentaram as doses de N aplicadas, obtiveram aumento nos teores foliares de P e, na comparação dos teores médios de fósforo nas folhas com pecíolos do feijoeiro em função das de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , observou que os resultados de P foliar estavam dentro das faixas adequadas propostas MARTINEZ et al. (1999); WILCOX e FAGERIA (1976) e MALAVOLTA (1992). No presente experimento, uma dose de 30  $\text{kg ha}^{-1}$  foi adicionada em

cobertura aos 6 dias da semeadura. Em experimento similar a este, WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO (2003) utilizaram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação para testar a combinação de 0, 25, 50 e 75 kg P ha<sup>-1</sup> com 2 Mg ha<sup>-1</sup> peso seco de resíduo de galinheiro, resíduo de curral, palha de milho e composto. A absorção e conseqüente acumulação de P aumentou linearmente com a produção de milho. A combinação de esterco de galinha com a rocha fosfatada de Minjingu propiciou a maior média de absorção de P pelo milho, seguido do composto, restos culturais de milho e esterco de curral. Em estudos de campo, estes autores trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxas de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada. A combinação de materiais orgânicos com a rocha fosfatada aumentou o conteúdo de P no tecido de milho. Utilizando <sup>32</sup>P marcado de superfosfato simples XIONG et al. (1996) verificaram que esta fonte de P adicionada a uma rocha fosfatada pouco reativa aumentaram significativamente a absorção de P por azevém cultivado num solo Typic Hapludults, mas mostrou que não aumentou a utilização do P. CHIEN, MENON e BILLINGHAM (1996) utilizando o mesmo P marcado de superfosfato triplo indicou aumento de absorção de P de uma rocha de reatividade média pelas culturas do milho e feijão caupi, cultivadas também em um solo Typic Hapludult. SIMONETE et al., (2003) aplicaram doses de 0, 16,05, 32,10, 48,15, 64,20 e 80,25 g vaso<sup>-1</sup> de lodo de esgoto, respectivamente, 0, 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha<sup>-1</sup> base seca a um Argissolo Vermelho-Amarelo em Casa de vegetação. Foram adicionados aos tratamentos P, K e P+K. A complementação com P mineral não proporcionou efeito significativo no P acumulado pelo milho, sugerindo que o P adicionado via lodo de esgoto foi suficiente para atender à exigência das plantas pelo nutriente.

Segundo MALAVOLTA (2006) a absorção do H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> é máxima quando o magnésio está disponível em concentrações adequadas na superfície de raízes. É considerado um carregador de P por participar na ativação de ATPases de membrana que participam de absorção iônica. Inúmeros trabalhos indicaram para diversas culturas que o P ao lado do magnésio proporcionam condições nutricionais satisfatórias para produção de plantas cultivadas (FAGERIA, 2001; SALEQUE et al., 2001), inclusive as forrageiras como *Brachiaria brizanta* e *B. decumbens* (ALMEIDA,

1998). VIEIRA et al., (2005) aplicaram 1,5; 3 e 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo e adubação química num Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/ argilosa e verificaram que nos tratamentos com lodo os teores de P nos grãos de soja não diferiram, significativamente, daqueles obtidos com os tratamentos testemunha ou com adubação mineral. ZAPATA e ZAHARAH (2002) observaram que uma taxa de 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo o ST foi o melhor tratamento enquanto que os dados de menor absorção de P foram para um lodo não irradiado e lodo irradiado. Valores intermediários foram obtidos nos tratamentos contendo ST em mistura com lodo. A absorção de P no tratamento com rocha sozinha foi significativamente diferentes daqueles com menores valores. Assim, os tratamentos com lodo, lodo irradiado e a rocha foram fontes efetivas de P para produção de massa seca como ST. Contudo, foram menos eficientes que o ST em termos de absorção de P. Dessa maneira, mostraram-se menos efetivos em comparação com o ST sob esta condições experimentais. A taxas de 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo, a maior taxa de absorção de P foi também obtida com o ST. Houve aumento de 6% em relação ao tratamento com ST a taxas de 50 mg P kg<sup>-1</sup> solo, o que se deve ao consumo de luxo já que a produção de massa seca não aumentou. A rocha da Flórida foi menos efetiva que o ST na absorção de P mas foi tão efetiva quanto o ST na produção de massa seca. A altas taxas (150 mg P kg<sup>-1</sup> solo) menos P foi obtido com as misturas de tratamentos lodo não irradiado, lodo irradiado e rocha sozinha e lodo irradiado + rocha. Todos eles proporcionaram quantidades absorvidas similares de P. Assim, estes materiais mostraram-se menos efetivos quando comparados ao ST. Valores intermediários de absorção de P foram observados naqueles tratamentos contendo ST nas misturas. Estes aumentos da taxa de aplicação de P resultaram em aumentos médios na absorção total de P de 51% para o lodo não irradiado e irradiados sozinhos e 28% para rocha sozinha. De maneira geral, em ambas taxas de aplicação de P a absorção maior com a fonte ST (CHIEN et al., 1996; KHASAWNEH e DOLL, 1978). A absorção de P com os tratamentos com lodo não irradiado e irradiado foram cerca de 50% da obtida com ST.

#### 4.2.2 Altura de plantas e componentes de produção do feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

As tabelas de análises de variância e comparação de médias de dados de altura de plantas e componentes de produção (grãos e massa seca total da parte aérea) de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico são apresentados no Apêndice 27. Foi verificada homogeneidade de variâncias para todas as variáveis avaliadas e não foram requeridas transformações de dados.

##### 4.2.2.1 Altura de plantas de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo.

A interação nível e fonte, assim como para estes fatores isolados não foram estatisticamente significativa para altura de plantas de feijoeiro (Figura 34 e Apêndice 27). Analogamente ao experimento em latossolo de Arapoti-PR, foi verificado um crescimento reduzido e, como consequência, pouca massa seca foi produzida pelas plantas em todos os tratamentos.

O fato pode dever-se à baixa disponibilidade de P e ao pH ácido iniciais neste Latossolo (Tabela 1) e, em função disso, carência de alguns micronutrientes no início do desenvolvimento de plantas. Todas as unidades experimentais mostraram, inicialmente, acentuada queda de folhas e nítida senescência e deficiência de P nas folhas mais velhas, excepcionalmente nas testemunhas. O fato pode dever-se à translocação deste nutriente, bastante móvel nas plantas (MALAVOLTA, VITTI e OLIVEIRA, 1997). FREIRE et al., (1996) afirma que o pH exerce efeito indireto sobre a disponibilidade de nutrientes e, a pH muito baixo as plantas não absorvem Ca e fósforo. ARNON (1953)<sup>18</sup> citado por MALAVOLTA (2004) relataram que “quando o suprimento externo de P torna-se limitante ocorre uma redistribuição do fósforo

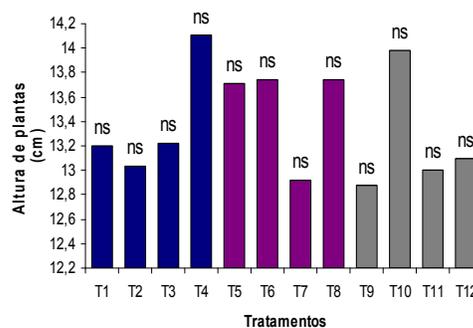
---

<sup>18</sup> ARNON, D. I. The physiology and biochemistry of phosphorus in green plants. In: PIERRE, W. H., NORMAN, A. G. (Ed.). **Soil and fertilizer phosphorus in crop nutrition**. New York: Academic Press, 1953, p. 1-42.

contido na planta, e o fosfato é retirado de células mais velhas, metabolicamente menos ativas e se move para as mais novas.

Assim sendo, os sintomas de falta de P são observados inicialmente nas folhas mais velhas e mais baixas. MALAVOLTA et al., (1980) verificaram que o desenvolvimento de feijoeiro e seu rendimento são seriamente afetados quando ocorre a deficiência de algum elemento essencial. Sintomas de deficiência inicial de P, Ca, Mg, Mo, Cu e Zn podiam ser observados em algumas plantas, mesmo em tratamentos que proporcionaram maiores produções, desaparecendo no decorrer do ciclo da cultura. Para OLIVEIRA et al., (1988) o feijoeiro cultivado em solo com pH

FIGURA 34 - ALTURA DE PLANTAS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)



T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA  
 T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS  
 T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** ns = não significativo (Tukey  $P > 0,05$ ).

extremo, como observado para este Latossolo Vermelho distrófico (Tabela 1), pode apresentar sintomas de deficiência de micronutrientes. Os sintomas de deficiência micronutrientes mostraram-se menos acentuados nas testemunhas, constituídas de lodo de esgoto alcalinizado puro. LOGAN e HARRISON (1995) salientaram que, lodo de esgoto tratado pelo processo N-Viro contém quantidades significativas de cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), além de pequenas quantidades de P (Tabela 3).

Além disso, era nítida a toxicidade de Al e Mn sobre as plantas de feijoeiro, já que o teor de  $Al^{3+}$  original do solo pode ser considerada alta (Tabela 1). Segundo OLIVEIRA et al., (1981a) e MESQUITA FILHO (1982) o feijoeiro quando cultivado em solo ácido mostra, além de sintomas de deficiência de Ca, Mg, P e Mo, toxidez de Al e Mn presentes em altas concentrações nestes solos. A deficiência de P está relacionada, dentre os problemas mais comuns, com o Ca, Mg e Zn (ZABOUROUSCI e LOPEZ, 1982). Este fato deve ter refletido no estado nutricional das plantas que desenvolveram poucos ramos, podendo ter influenciado significativamente na produção de grãos, massa seca da parte aérea e massa seca total da parte aérea de feijoeiro. Um outro fator que exerce influência sobre o desenvolvimento de plantas é a competição no vaso, pois, reduz o crescimento do sistema radicular e, conseqüentemente, a altura das plantas e a produção em geral. Todas essas observações de início de ciclo, feitas para este Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico foram confirmadas no experimento com Latossolo Vermelho distrófico.

#### 4.2.2.2 Produção de grãos de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foi estatisticamente significativa ( $F_{<0,05}$ ) para a produção de grãos de feijoeiro em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 27). O fato denota dependência entre fatores e, para se obter o melhor nível de adição para esta variável de produção, dever-se-á observar a fonte utilizada.

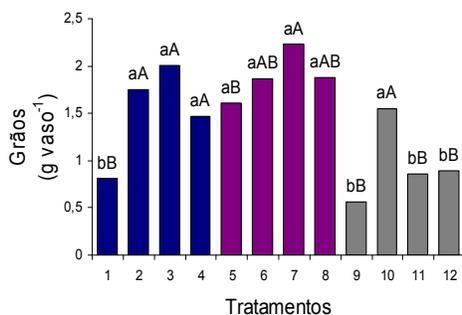
A comparação de médias de produção de grãos de feijoeiro (Figura 35A.1 e Apêndice 28) indica que os tratamentos referentes aos níveis de adição de 0,436%, 0,872% e 1,745% P foram estatisticamente iguais entre si e superiores às testemunhas, tanto para a fonte FPA quanto para SS. O tratamento referente ao nível de adição de 0,436% P a partir de ST foi superior estatisticamente à sua testemunha e aos demais níveis de adição. Altas correlações quadráticas foram verificadas para produção de grãos em função de níveis de adição de P a partir de

FPA (Figura 35A.2) e produção de grãos e níveis de adição de P de SS (Figura 35A.3). Para produção de grãos em função de níveis de adição de P provenientes de ST foi verificada baixa correlação (Figura 35A.4).

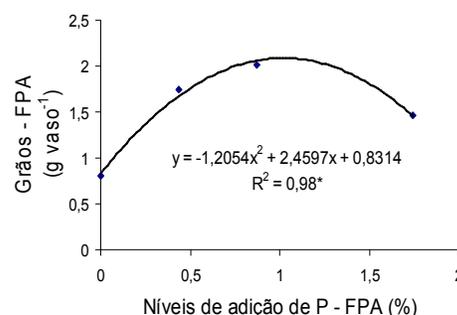
Os tratamentos relativos aos níveis de 0,436% P possuem maiores quantidades de lodo de esgoto puro nas misturas. Assim, a partir da igualdade obtida entre os três níveis de adição, seja para o FPA ou SS, conjectura-se que, o lodo alcalinizado puro nas misturas exerceram influência sobre a produção de grãos por possuírem pequenos teores de macro e micronutrientes em sua composição (LOGAN e HARRISON (1995). As características granulométricas e químicas originais das fontes de P aliadas à forma de aplicação (incorporação) podem também estar relacionados com a maior eficiência destas fontes para esta variável. O FPA farelado e o SS, de granulação menos grosseira que o ST abrangem um volume maior de solo, o que torna o P mais acessível ao sistema radicular das plantas que, conseqüentemente, absorveu P suficiente para produzir mais grãos. A maior quantidade de lodo puro nas misturas do nível de 0,436% P a partir do ST, devem ter proporcionado maior eficiência para este tratamento a partir desta fonte. O fato pode ser explicado pela disposição de outros nutrientes às plantas nessas doses puras de lodo desta mistura de adição (LOGAN e HARRISON, 1995), além do P do próprio lodo.

A alta correlação quadrática negativa verificada para produção de grãos em função do P extraído pelo extrator de Mehlich-1 para a fonte de adição FPA (Figura 36A.1 acima) indica que a produção de grãos diminui a partir de determinado nível de P no solo a partir desta fonte. Para o SS, a correlação positiva indica que, com o aumento dos teores extraíveis de P no solo a produção de grãos aumenta concomitantemente. Para a fonte de adição ST, baixa correlação quadrática negativa foi observada ( $R^2 = 0,49^*$ ).

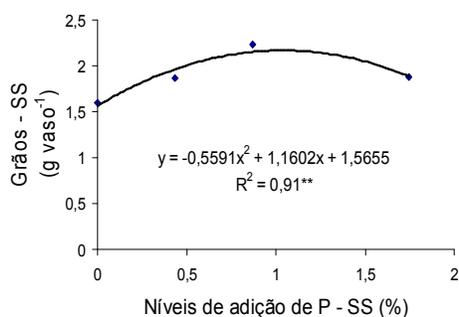
FIGURA 35 - (A.1) PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO COM FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA), SUPERFOSFATO SIMPLES (SS) E SUPERFOSFATO TRIPLO ST); (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE FPA; (A.3) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE SS; (A.4) CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO A PARTIR DE ST



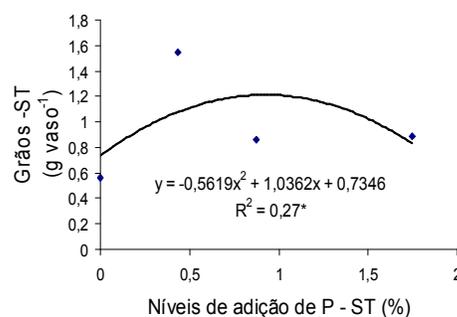
(A.1)



(A.2)



(A.3)



(A.4)

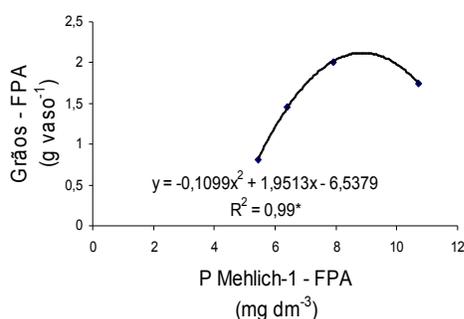
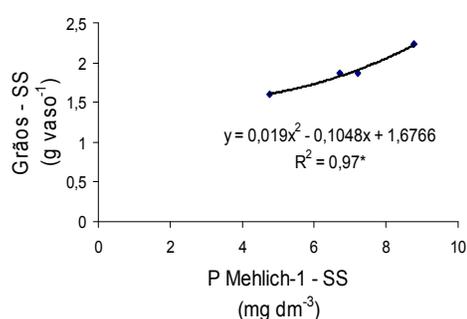
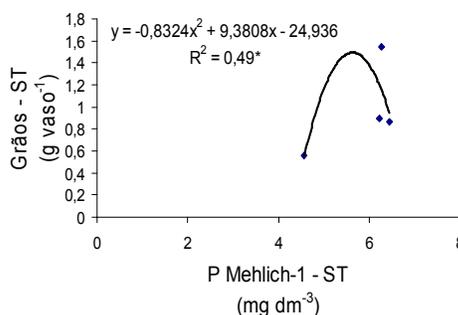
T1 a T4 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de FPA

T5 a T8 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de SS

T9 a T12 = Tratamentos ou níveis de adição de fósforo a partir de ST

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado na figura que contém a comparação de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

FIGURA 36 - **(A.1)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (FPA); **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (SS); **(A.3)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 DE LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE 4 NÍVEIS DE FÓSFORO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO (ST)

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

P Mehlich-1-FPA = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com FPA

P Mehlich-1-SS = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com SS

P Mehlich-1-ST = P Mehlich-1 extraído a partir de níveis de adição com ST

Grãos - FPA = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de FPA

Grãos - SS = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de SS

Grãos - ST = produção de grãos com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de níveis de P de ST

VIEIRA et al., (2005) trataram um Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/argilosa e cultivaram soja com dose zero de lodo de esgoto; soja com 1,5 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja com 3 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto; soja com 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto e soja com adubação química. Obtiveram maior produtividade com as duas maiores doses de lodo. Em média, esses tratamentos produziram cerca de 547 e 163 kg ha<sup>-1</sup> de grãos a mais, respectivamente, do que os tratamentos testemunha e com adubação mineral. Nos tratamentos que não receberam adubação fosfatada ou que a receberam em quantidades não suficientes, a produtividade foi menor. As produtividades da soja dos dois anos agrícolas demonstraram que tanto 3 quanto 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo foram suficientes para suprir as demandas da cultura em P. BISCAIA e MIRANDA, (1996) obtiveram aumentos na produtividade da cultura do milho com a adição de lodo de esgoto. Em experimento conduzido a campo, utilizando um Latossolo Vermelho distrófico, SILVA, RESCK e SHARMA (2002) aplicaram doses altas de 54, 108 e 216 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto úmido associado à aplicação de calcário (1 Mg ha<sup>-1</sup>) e à adubação mineral completa. Os resultados indicaram manutenção da produtividade de milho por três anos, obtida por dose única de lodo de esgoto no primeiro ano, sem o emprego de outro insumo, havendo efeito residual mesmo na dose mais baixa. Para LOURENÇO et al., (1995), a aplicação de lodo de esgoto em solos agrícolas conduziu a aumentos tanto na absorção de nutrientes quanto na produtividade das culturas do feijão, milho e bracatinga. WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO, em estudos de campo, trataram um Orthic Ferralsol, textura média com 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de restos culturais de milho; 1 Mg ha<sup>-1</sup> e 2 Mg ha<sup>-1</sup> de esterco de curral e duas taxa de aplicação de P para cada tratamento com os materiais orgânicos de 0 e 60 kg ha<sup>-1</sup> de P da rocha fosfatada de Minjingu. Na média a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> na forma de rocha fosfatada aumentou a produção de grãos em relação ao controle em 71% e 10% nos solos das localidades de Busia e Siaya, respectivamente. A aplicação de materiais orgânicos com ou sem rocha fosfatada proporcionou efeitos variáveis na produção de grãos. A combinação da rocha com materiais orgânicos contudo, aumentou a produção de grãos. O maior aumento foi observado no solo de Siaya na primeira estação de cultivo. Em Busia, a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> da rocha fosfatada com restos culturais de milho na taxa de 2 Mg ha<sup>-1</sup> produziram 67% mais grãos comparada com a produção obtida com a aplicação de P sozinho. Do mesmo modo

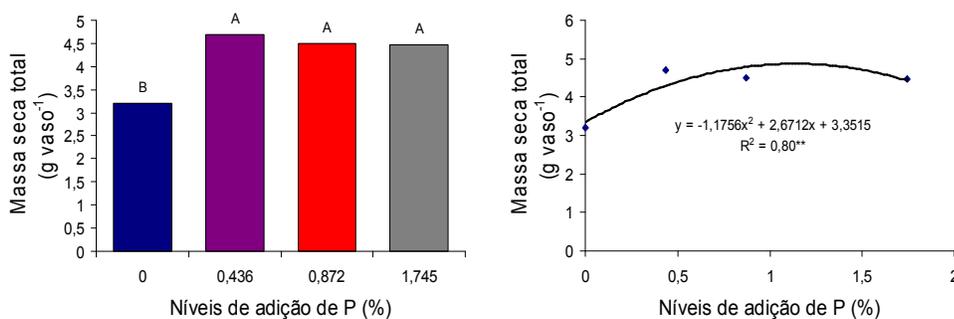
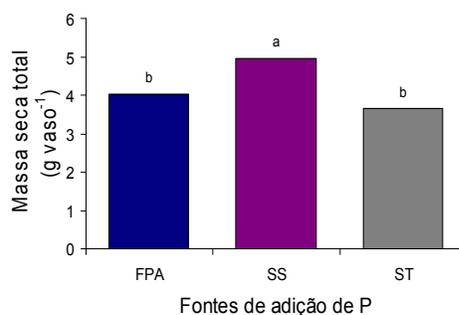
na localidade de Siaya a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> na forma da rocha combinada com esterco de curral a 2 Mg ha<sup>-1</sup> proporcionou o maior aumento de 60% na produção de grãos comparado com a produção obtida com a aplicação de 60 kg P ha<sup>-1</sup> sozinho. Em ambas localidades foi monitorado o efeito residual de tratamentos com P e materiais orgânicos na segunda estação e nenhum dos tratamentos foram reaplicados. Na média os níveis de produção em Busia foram sensivelmente maiores na primeira estação. Em Siaya, contudo, na segunda estação a produção foi muito baixa comparada à da primeira estação. Os tratamentos com materiais orgânicos continuaram a exercer variados efeitos mas, na média, foram positivos. No entanto, não houve interação entre P e aplicação de materiais orgânicos na produção em Busia na primeira estação. Na segunda estação, contudo, onde o P não foi aplicado foram maiores as produções com os tratamento contendo 1 Mg ha<sup>-1</sup> de materiais orgânicos, o oposto de onde o P foi aplicado. Em Siaya, a interação dos efeitos entre P e materiais orgânicos na produção foram observados nas duas estações. Na primeira estação os tratamentos que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> sem material orgânico esterco de curral ou restos de milho, proporcionaram menores produções que nos tratamentos que receberam somente material orgânico. A taxa de 1 Mg ha<sup>-1</sup>, ambos tratamentos com material orgânico, com ou sem P deram produções similares, mas a 2 Mg ha<sup>-1</sup>, os tratamentos que receberam 60 kg P ha<sup>-1</sup> deram maiores produções que os sem P. Embora muito reduzida, produções similares foram observadas na segunda estação. VIEIRA et al., (2005) aplicaram 1,5; 3 e 6 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo e adubação química num Latossolo Vermelho distroférico, textura areia/argilosa e verificaram que as maiores produtividades de soja foram obtidas nas maiores doses de lodo em dois anos agrícolas. Porém, os teores de vários elementos nos grãos de soja, nos tratamentos com lodo, não diferiram significativamente daqueles obtidos com os tratamentos testemunha ou com adubação mineral.

#### 4.2.2.3 Produção de seca total da parte aérea de feijoeiro cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico fertilizado com lodo de esgoto alcalinizado adicionado de diferentes níveis e fontes de fósforo

A interação nível e fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não foi significativa para produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Apêndice 27). O fato indica que estes fatores são independentes entre si. No entanto, os fatores nível e fonte mostraram-se estatisticamente significativos ( $F_{<0,01}$ ) e, assim, existe, pelo menos, um nível melhor e uma melhor fonte de adição de P para esta variável.

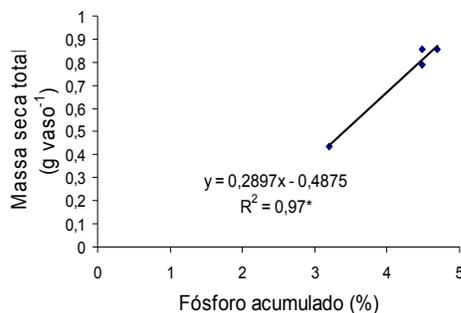
A comparação de médias de Produção de massa seca total de feijoeiro indica que os tratamentos referentes aos níveis 0,436%, 0,872% e 1,745% P (Figura 37A.1 e Apêndice 29) mostraram-se estatisticamente iguais entre si e superiores à testemunha para esta variável. A produção de massa seca total correlacionou-se com os níveis de adição de P em lodo de Esgoto alcalinizado, seguindo um modelo quadrático (Figura 37A.2), indicando uma tendência de diminuição da produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro em função do aumento de níveis de adição. A melhor fonte de adição de P para a produção de massa seca total da parte aérea foi o SS (Figura 37A.3), provavelmente em função de sua granulometria menos favorável aos processos de adsorção e precipitação de P, e à presença de enxofre (PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN, 2004) e micronutrientes, além de pequenas quantidades de micronutrientes em sua composição mínima (BRASIL, 1983; MALAVOLTA, 1994). A produção total de massa seca total da parte aérea de feijoeiro correlacionou-se com a acumulação de P, indicando que, com o aumento do P acumulado ocorre concomitantemente maior produção de massa seca total da parte aérea de feijoeiro (Figura 38).

FIGURA 37 - **(A.1)** PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE 4 NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA, SUPERFOSFATO SIMPLES E SUPERFOSFATO TRIPLO **(A.2)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.3)** PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FONTES DE ADIÇÃO DE FÓSFORO; **(A.4)** CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1

**(A.1)****(A.2)****(A.3)**

**Nota:** Letras maiúsculas referem-se aos níveis e minúsculas às fontes de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado nas figuras que contêm as comparações de médias (Tukey  $P > 0,05$ ).

FIGURA 38 - CURVA DE TENDÊNCIA DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO EM FUNÇÃO DE FÓSFORO ACUMULADO



Segundo DEFELIPO et al., (1991); DA ROS et al., (1993); BERTON et al., (1997) lodos de esgoto foram testados para várias culturas em relação à produtividade sob diversas condições de solo, clima e doses. Aumentos equiparáveis ou superiores aos obtidos com a adubação mineral recomendada têm sido encontrados (SILVA et al., 2001). WAIGWA, OTHIENO e OKALEBO trataram um Rhodic Ferralsol, de textura argilosa, em casa de vegetação com doses de 0, 25, 50, e 75 kg P ha<sup>-1</sup> da rocha fosfatada de Minjingu, combinadas ou não com resíduo de galinheiro, resíduo de curral, palha de milho e um composto, na dose de 2 Mg ha<sup>-1</sup> de peso seco. A produção de massa seca de milho com os diferentes materiais orgânicos e suas combinações variaram, mas, na média o esterco de galinheiro + rocha proporcionou maior produção seguido de esterco de curral + rocha. A combinação de composto ou restos culturais de milho com a rocha fosfatada proporcionaram produções iguais à testemunha. O esterco de galinheiro combinado com 50 kg P ha<sup>-1</sup>, dose similar à utilizada neste experimento, proporcionou as maiores produções de massa seca de milho. De maneira geral, o aumento das taxas de P, com ou sem os materiais orgânicos, aumentaram linearmente a produção de massa seca do milho em casa de vegetação. ZAPATA e ZAHARAH (2002) desenvolveram um experimento em casa de vegetação a fim de avaliar a eficiência agrônômica relativa de fontes alternativas de P. Trataram um solo Dystric Eutrocrepts arenoso, húngaro, com misturas de superfosfato triplo + rocha fosfática da Flórida a 50 mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> (1:2), super triplo + lodo de esgoto irradiado a 50 mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> (1:2) e lodo de esgoto irradiado a 50

mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. Utilizaram um controle sem adição de P e uma solução de <sup>32</sup>P foi incluída como referência para o método isotópico. O solo tratado foi cultivado com trigo (*Triticum vulgare*), não se observando diferenças na produção de massa seca nas misturas que continham a dose de 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. A mistura de SL + ST produziu quantidades significativamente maiores de massa seca de trigo em comparação ao ST sozinho. A rocha fosfática mostrou aumento de massa seca da cultura a altas taxas de P, em particular, no tratamento com lodo de esgoto. GILKES e BOLLAND (1990) salientaram que diferenças na resposta de plantas podem ser explicadas pela característica de dissolução diferente do ST e da rocha fosfatada. À taxa de 150 mg P kg<sup>-1</sup> o lodo de esgoto sozinho produziu quantidades maiores de massa seca comparado com o ST. FROSSARD et al., (1996) e GERZABEK e HERGER (1997) encontraram que, lodo a altas taxas de P são mais ativas biologicamente e liberaram mais P quando da decomposição e, conseqüentemente, produzem mais. SOUMARE, TACK e VERLOO (2003) conduziram um experimento em vasos no qual foi avaliado o efeito de fertilização mineral e composto no crescimento e composição química de azevém (*Lolium perenne* L.) cultivado em dois solos agrícolas da Malásia. Os tratamentos incluíram um controle não fertilizado, NPK sozinho, dose de NPK + 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto de resíduo sólido municipal, NPK + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto, NPK + 100 Mg ha<sup>-1</sup>, PK + 50 Mg ha<sup>-1</sup>, NP + 50 Mg ha<sup>-1</sup>, P + 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto de resíduo sólido municipal, e 50 Mg ha<sup>-1</sup> do composto somente. Tanto o composto quanto a adubação mineral aumentaram significativamente a produção de massa seca de azevém. A aplicação de 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto sozinho aumentou a produção de massa seca em 10 e 17,5% enquanto que com a adubação NPK incrementou-se em 69,7 e 65% para os solos de Baguineda e Gao, respectivamente. A combinação de 25 Mg ha<sup>-1</sup> de composto + adubação mineral para o solo de Gao e 50 Mg ha<sup>-1</sup> de composto + NPK para o solo de Bagueda afetaram significativamente a produção de massa seca. As concentrações de P variaram de acordo com o solo. Foram verificados aumentos também nos teores de carbono orgânico do solo, P disponível, cálcio, magnésio e pH do solo em todos os tratamentos que receberam composto.

#### 4.2.2.4 Índices de Eficiência Agronômica

Os índices de eficiência agronômica (IEA) foram calculados a partir dos dados de produção massa seca total da parte aérea de feijoeiro obtida com os melhores tratamentos a partir da melhor fonte (SS) (Tabela 10), de acordo com o que sugeriram CHIEN, SALE e FRIESEN (1990a). A saber: os níveis de 0,436%, 0,872% e 1,745% de adição de P oriundo de SS em lodo de esgoto alcalinizado.

TABELA 10 - ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE DIFERENTES FONTES A PARTIR DE DADOS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

NAP	MSTPA/ST	MSTPA/SS	IEA
(%)	(g vaso <sup>-1</sup> )	(g vaso <sup>-1</sup> )	(%)
0,436	4,54	5,28	116,30
0,872	3,505	5,388	153,72
1,745	3,785	5,32	140,55

NAP: níveis de adição de P em de lodo de esgoto alcalinizado

MSTPA - ST: massa seca total da parte aérea de feijoeiro produzida com níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de superfosfato triplo

MSTPA - SS = massa seca total da parte aérea de feijoeiro produzida com os níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de superfosfato simples

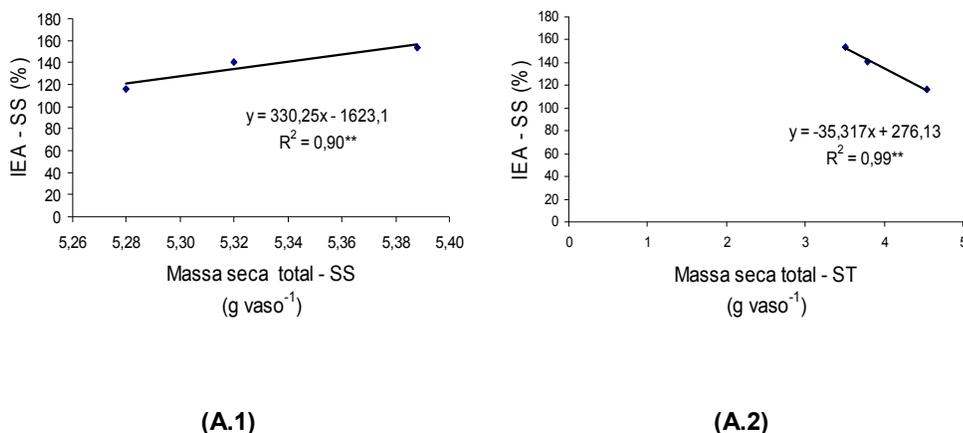
IEA - FPA = Índice de eficiência agronômica de níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de fosfato fosfato natural parcialmente acidulado alvorada

IEA - SS = Índice de eficiência agronômica para níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado a partir de SS

Os IEA aumentaram linearmente com os níveis de adição de P a partir do SS (Figura 39). Dos valores da Tabela 10 acima, percebe-se que as produções de massa seca total diminuiram com o aumento de níveis de adição de P a partir do ST (fonte de referência). Dessa forma, os maiores índices de eficiência agronômica observados para maiores níveis de adição de P não se devem a maiores produções de massa seca total obtida com a fonte testada (SS), mas sim, pelas produções de massa seca decrescentes verificadas com o ST a medida em que aumentavam os níveis de adição a partir desta fonte. Este fato indica menor eficiência do ST como fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado. Com base nestes resultados, o melhor IEA foi obtido com o nível de adição de P de 0,436% (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a partir da fonte testada (SS), o qual foi calculado com a maior produção de massa seca total

da parte aérea de feijoeiro obtida com a fonte de referência (ST). Assim sendo, o SS foi 16,3% mais eficiente para a produção de massa seca da parte aérea em relação ao ST. Cabe salientar que este nível de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado também foi verificado melhor para as fontes FPA e SS no Latossolo Vermelho distrófico de Arapoti-PR.

FIGURA 39 - (A.1) CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (IEA - SS) EM FUNÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA PRODUZIDA A PARTIR DESTA FONTE; (A.2) CURVA DE TENDÊNCIA DE ÍNDICES DE EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE SUPERFOSFATO SIMPLES EM FUNÇÃO DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL A PARTIR DE LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE FÓSFORO DE SUPERFOSFATO TRIPLO



De maneira geral, a literatura aponta o ST como fonte de referência em cálculos de IEA (PROCHNOW, ALCARDE e CHIEN, 2004). Cabe salientar que, um exíguo desenvolvimento de plantas foi observado durante todo o ciclo da cultura. Assim, também, observou-se um pequeno porte do sistema radicular, que, aliado à granulometria mais grosseira do ST (Tabela 4) e à forma de aplicação do fertilizante (incorporado), podem não ter permitido o acesso das plantas ao P desta fonte e, conseqüentemente, menor produção de massa seca foi verificada. Para os maiores níveis de adição, que possuíam menores quantidades de lodo alcalinizado puro nas misturas, pode não ter ocorrido a contribuição do P oriundo da dissolução do biossólido, levando estes tratamentos a menores produções de massa seca. A adsorção de P desta fonte também deve ter corroborado com sua menor eficiência,

a despeito do fato de o fenômeno da adsorção ocorrer lentamente e poder levar anos para atingir o equilíbrio, devendo ser, também, responsável pela diminuição da disponibilidade de P de um solo recém-fertilizado (BARROW, 1985).

ZAPATA e ZAHARAH (2002) desenvolveram experimento em casa de vegetação a fim de avaliar a eficiência agrônômica relativa de fontes alternativas de P. Estes autores trataram um solo Dystric Eutrocrepts arenoso, húngaro, com misturas de superfosfato triplo + rocha fosfática da Flórida a 50 mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> (1:2), super triplo + lodo de esgoto irradiado a 50 mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> (1:2) e lodo de esgoto irradiado a 50 mg P kg<sup>-1</sup> (1:1) e 150 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. Foi utilizado um controle sem adição de P, e uma solução de <sup>32</sup>P foi incluída como referência para o método isotópico. Não houve diferenças significativas entre os índices de eficiência agrônômica para a massa seca de trigo para as várias fontes de P a taxas de 50 mg P kg<sup>-1</sup> de solo. A taxas de 150 mg kg<sup>-1</sup> de solo, somente o IEA para o tratamento contendo lodo foi 19% maior que o ST, enquanto os IEA do ST sozinho ou as misturas de ST + SLI ou ST + rocha foram intermediárias.

## 5 CONCLUSÕES

Sob as presentes condições experimentais concluiu-se que, em Latossolo Vermelho distrófico, textura média, de Arapoti-PR:

- 1) Lodo de esgoto alcalinizado (N-Viro Soil) adicionado de P alterou as variáveis químicas pH  $\text{CaCl}_2$ , Ca, Mg e Al trocáveis, acidez potencial e P extraível Mehlich-1;
- 2) Quando lodo de esgoto alcalinizado foi adicionado de 0,436% P (1%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) a partir de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada o extrator resina trocadora de íons extraiu mais P deste Latossolo;
- 3) O lodo de esgoto alcalinizado não proporcionou condições favoráveis à indisponibilidade de P para o feijoeiro quando adicionado de P, mesmo a partir de níveis menores de adição (0,436% P e 0,872% P), que possuíam maiores doses deste biossólido nas misturas de adição;
- 4) O lodo de esgoto alcalinizado aumentou a acumulação de P pelo feijoeiro, principalmente a partir de menores níveis de adição de P (0,436% e 0,872% P), que possuíam maiores doses deste biossólido nas misturas de adição;
- 5) Os níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não influenciaram o crescimento em altura de plantas de feijoeiro;
- 6) Lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P aumentou a produção de grãos e massa seca total da parte aérea de feijoeiro;
- 7) As melhores fontes de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foram o fosfato natural parcialmente acidulado alvorada e superfosfato simples;
- 8) Os melhores níveis de adição de P foram 0,436% (1%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e 0,872% P (2%  $\text{P}_2\text{O}_5$ );
- 9) O superfosfato triplo foi a pior fonte de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado;

Sob as mesmas condições experimentais, concluiu-se que, em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média, de Contenda-PR:

- 1) Lodo de esgoto alcalinizado (N-Viro Soil) adicionado P alterou suas variáveis químicas pH  $\text{CaCl}_2$ , Ca, Mg e Al trocáveis, acidez potencial e P extraível Mehlich-1;

- 2) Quando lodo de esgoto alcalinizado adicionado de 0,436% P (1%  $P_2O_5$ ) a partir de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada o extrator resina trocadora de íons também extraiu mais P neste Latossolo;
- 3) Lodo de esgoto alcalinizado não proporcionou condições favoráveis à indisponibilidade de P para o feijoeiro, mesmo a partir dos menores níveis de adição de P (0,436% e 0,872% P), que possuíam maiores doses deste biossólido nas misturas de adição;
- 4) Lodo de esgoto alcalinizado aumentou a acumulação de P pelo feijoeiro, principalmente a partir dos níveis de adição 0,436% P e 0,872% P, que possuíam maiores doses de lodo de esgoto alcalinizado puro nas misturas de adição;
- 5) Os níveis de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado não influenciaram o crescimento em altura de plantas de feijoeiro;
- 6) Lodo de esgoto alcalinizado adicionado com P aumentou a produção de grãos e massa seca total da parte aérea de feijoeiro;
- 7) O melhor nível de adição de P foi 0,436% P (1%  $P_2O_5$ );
- 8) As melhores fontes de adição de P em lodo de esgoto alcalinizado foram o fosfato natural parcialmente acidulado alvorada e o superfosfato simples;
- 9) O superfosfato triplo foi a pior fonte de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES

Estudos posteriores sob condições de campo podem ser conduzidos a fim de se determinar semelhanças de resultados. Porém, estes testes de campo devem ser conduzidos concomitante a novos ensaios de casa de vegetação, objetivando-se ratificar estes resultados utilizando-se, inclusive, outras classes de solos do Estado do Paraná. Potenciais efeitos residuais também devem ser investigados tanto em casa de vegetação quanto em nível de campo.

Recomenda-se ainda que, em novos ensaios de adição de P a lodo de esgoto alcalinizado, sejam testadas granulometrias menores de lodo (1 mm e 2 mm, por exemplo) e de fontes de fósforo (superfosfato simples e triplo, MAP e DAP e outros fosfatos naturais reativos) a fim de se ratificar ou melhorar os resultados verificados nestes experimentos. Aspectos econômicos e de sorção, dessorção e precipitação de P devem ser considerados em outros estudos a fim de se elucidar a eficiência agrônômica e econômica no longo prazo de lodo de esgoto alcalinizado adicionado de P oriundo de diferentes fontes. Em relação às variáveis de produção, poder-se-ia futuramente avaliar-se a massa do sistema radicular bem como P nele acumulado. Variáveis de solo como a soma de bases e saturação por bases podem ser incluídas nas avaliações.

Em se ratificando a campo os resultados ora obtidos sugere-se, com base nestes e noutros resultados, pesquisas acerca de formas de aplicação das percentagens adequadas de lodo de esgoto alcalinizado e fontes de P de modo a compor quantidades adequadas das misturas para utilização em nível de produtor. E, finalmente, sugere-se a adequação de maquinaria para que se possa facilitar o máximo possível a aplicação no solo de misturas de lodo de esgoto + P e/ou outros nutrientes.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Algumas variáveis apresentaram comportamento semelhante em ambos Latossolos. Dentre elas estão:

- 1) pH  $\text{CaCl}_2$ , que apesar de as interações nível e fonte de adição de P apresentarem resultados diferentes indicaram que, quantidades maiores de lodo nas misturas exercem maior influência sobre esta variável;
- 2) Al trocável;
- 3) acidez potencial;
- 4) Ca trocável;
- 5) Carbono orgânico oxidável;
- 6) Fósforo Mehlich-1;
- 7) Fósforo Mehlich-1 e resina trocadora de íons que apresentaram comportamento diferente em relação à interação nível e fonte de adição de fósforo. Porém, em ambos experimentos (solos), todos tratamentos aumentaram os valores desta variável com ambos os extratores;
- 8) A percentagem de fósforo acumulado (a despeito de seus resultados diferentes em relação à interação nível e fonte de adição de P) que, em Latossolo Vermelho-amarelo, mostraram menores valores. Porém, os melhores tratamentos foram os mesmos que em Latossolo Vermelho-distrófico, de Arapoti-PR;
- 9) Altura de plantas, não significativo para ambos os experimentos (solos);
- 10) Produção de grãos, sendo maior no Latossolo Vermelho distrófico, de Arapoti-PR;

## APÊNDICES

APÊNDICE 1 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (19,34% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).....	189
APÊNDICE 2 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (14,37% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).....	192
APÊNDICE 3 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO (14,37% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) .....	195
APÊNDICE 4 - TABELA DE ANÁLISES DE VARIÂNCIA DO EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO REFERENTE AOS DADOS QUÍMICOS DE SOLO E FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO .....	198
APÊNDICE 5 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE pH CaCl <sub>2</sub> NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	199
APÊNDICE 6 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ALUMÍNIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	199
APÊNDICE 7 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ACIDEZ POTENCIAL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	200
APÊNDICE 8 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE CÁLCIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	200
APÊNDICE 9 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	201
APÊNDICE 10 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO.....	201

APÊNDICE 11 - TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FOSFORO .....	202
APÊNDICE 12 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DE ARAPOTI-PR FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO.....	202
APÊNDICE 13 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO .....	203
APÊNDICE 14 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DE ARAPOTI-PR REFERENTES AOS DADOS DE ALTURA DE PLANTAS, PRODUÇÃO GRÃOS E MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO .....	203
APÊNDICE 15 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO.....	204
APÊNDICE 16 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA (MSTPA) DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO .....	204
APÊNDICE 17 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO REFERENTES AOS DADOS QUÍMICOS DE SOLO E PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO .....	205
APÊNDICE 18 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE pH CaCl <sub>2</sub> NUM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	206
APÊNDICE 19 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO-VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO.....	206

APÊNDICE 20 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ACIDEZ POTENCIAL (H+AI) EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	207
APÊNDICE 21 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	207
APÊNDICE 22 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO.....	208
APÊNDICE 23 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO .....	208
APÊNDICE 24 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE FÓSFORO MEHLICH-1 E RESINA TOCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO .....	209
APÊNDICE 25 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO MEHLICH-1 E RESINA TOCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO .....	209
APÊNDICE 26 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO.....	210
APÊNDICE 27 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO NUM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR, REFERENTES AOS DADOS DE ALTURA DE PLANTAS, PRODUÇÃO DE MASSA SECA DA PARTE AÉREA, GRÃOS E MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO.....	210
APÊNDICE 28 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO CULTIVADO NO LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR.....	211

APÊNDICE 29 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO NO LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÍFICO DE CONTENDA-PR.....	211
---	-----

APÊNDICE 1 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE FOSFATO NATURAL PARCIALMENTE ACIDULADO ALVORADA (19,34% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

1.1) Cálculo da quantidade de fosfato natural parcialmente acidulado alvorada (FPA) para suprir 1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg FPA} & \quad \quad \quad 19,34\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x \text{ kg FPA} & \quad \quad \quad 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x & = 5,17 \text{ kg FPA/1 kg de P}_2\text{O}_5 \text{ (1\% P}_2\text{O}_5\text{)}. \end{aligned}$$

Ao se transformar P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para P, tem-se: 5,17 kg FPA = 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> x 0,436 = 0,436% P

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,436% P), tem-se na mistura de adição:

**94,83 kg de lodo puro + 5,17 kg FPA = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de FPA e de lodo puro na mistura de adição a 1% para suprir recomendação de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>:

a) cálculo da quantidade de FPA na mistura:

$$\begin{aligned} 5,17 \text{ kg FPA} & \quad \quad \quad 1 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ x & \quad \quad \quad 105 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ x & = 542,85 \text{ kg FPA para suprir } 105 \text{ kg P}_2\text{O}_5. \end{aligned}$$

b) cálculo da quantidade de lodo puro na mistura referente ao lodo de esgoto alcalinizado adicionado com 1% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de FPA (LA 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> FPA):

$$\begin{aligned} 100 \text{ kg LA } 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ FPA} & \quad \quad \quad 5,17 \text{ kg FPA} \\ x & \quad \quad \quad 542,85 \text{ kg FPA} \\ x & = 10500 \text{ kg de mistura para suprir a dose de } 105 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (45,581 kg P)}. \end{aligned}$$

Dessa forma:

**10500 kg de mistura – 542,85 kg FPA = 9957,15 kg de lodo de esgoto alcalinizado puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.**

1.2) Cálculo da quantidade de fosfato natural parcialmente acidulado para suprir 2 kg de  $P_2O_5$  (2%  $P_2O_5$ ):

100 kg FPA \_\_\_\_\_ 19,34%  $P_2O_5$

x kg FPA \_\_\_\_\_ 2%  $P_2O_5$

$x = 10,34 \text{ kg FPA} / 2 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ (2\% } P_2O_5)$

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $2\% P_2O_5 \times 0,436 = 0,872\% P$

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 2%  $P_2O_5$  (0,872% P), tem-se na mistura de adição:

**89,66 kg de lodo puro + 10,34 kg FPA = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de FPA e de lodo puro na mistura de adição a 2% para suprir recomendação de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de FPA na mistura de adição:

10,34 kg FPA \_\_\_\_\_ 2 kg  $P_2O_5$

x \_\_\_\_\_ 105 kg  $P_2O_5$

**x = 542,85 kg FPA para suprir 105 kg  $P_2O_5$ .**

b) cálculo da quantidade de lodo puro na mistura referente ao lodo de esgoto alcalinizado adicionado com 2% de  $P_2O_5$  de FPA (LA 2%  $P_2O_5$  FPA):

100 kg LA 2%  $P_2O_5$  FPA \_\_\_\_\_ 10,34 kg FPA

x \_\_\_\_\_ 542,85 kg FPA

**x = 5250 kg de mistura para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  (45,581 kg P).**

Dessa forma:

**5250 kg de mistura – 542,85 kg FPA = 4707,15kg de lodo de esgoto alcalinizado puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ .**

1.3) Cálculo da quantidade de fosfato natural parcialmente acidulado para suprir 4 kg de  $P_2O_5$  (4%  $P_2O_5$ ):

100 kg FPA \_\_\_\_\_ 19,34%  $P_2O_5$

x kg FPA \_\_\_\_\_ 4%  $P_2O_5$

$x = 20,68 \text{ kg FPA} / 4 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ (4\% } P_2O_5)$

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $4\% P_2O_5 \times 0,436 = 1,745\% P$

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado 4%  $P_2O_5$  (1,745% P), tem-se na mistura de adição:

**79,32 kg de lodo puro + 20,68 kg FPA = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de FPA e de lodo puro na mistura de adição a 4% para suprir recomendação de 105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de FPA na mistura de adição:

$$\begin{array}{r} 20,68 \text{ kg FPA} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 4 \text{ kg } P_2O_5 \\ \times \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 105 \text{ kg } P_2O_5 \end{array}$$

**x = 542,85 kg FPA para suprir 105 kg  $P_2O_5$ .**

b) cálculo da quantidade de lodo puro na mistura referente ao lodo de esgoto alcalinizado adicionado com 4% de  $P_2O_5$  de FPA (LA 4%  $P_2O_5$  FPA):

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg LA } 4\% P_2O_5 \text{ FPA} \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 20,68 \text{ kg FPA} \\ \times \quad \underline{\hspace{2cm}} \quad 542,85 \text{ kg FPA} \end{array}$$

**x = 2625 kg de mistura para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$  (45,581 kg P).**

Dessa forma:

**2625 kg de mistura – 542,85 kg FPA = 2082,15 kg de lodo de esgoto alcalinizado puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ .**

APÊNDICE 2 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO SIMPLES (14,37% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

2.1) Cálculo da quantidade de superfosfato simples (SS) para suprir 1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 14,74\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ \times \text{ kg FPA} \quad \text{_____} \quad 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ \hline x = 6,78 \text{ kg SS/1 kg P}_2\text{O}_5 \text{ (1\% P}_2\text{O}_5) \end{array}$$

Ao se transformar P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para P, tem-se: 6,78 kg SS = 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> x 0,436 = 0,436% P.

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0,436% P) a partir do SS, tem-se na mistura de adição:

**93,22 kg de lodo puro + 6,78 kg de SS = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de SS e de lodo puro na mistura de adição a 1% para suprir recomendação de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>:

a) cálculo da quantidade de SS na mistura:

$$\begin{array}{l} 6,78 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 1 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ \times \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ \hline \mathbf{x = 711,9 \text{ kg SS para suprir 105 kg P}_2\text{O}_5.} \end{array}$$

b) cálculo da quantidade de fósforo na dose da mistura para suprir 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg LA } 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \quad \text{_____} \quad 6,78 \text{ kg SS} \\ \times \quad \text{_____} \quad 711,9 \text{ kg SS} \\ \hline \mathbf{x = 10500 \text{ kg de mistura para suprir a dose de } 105 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (45,581 kg P).} \end{array}$$

Dessa forma:

**10500 kg de mistura – 711,9 kg SS = 9788,1 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.**

Assim, tem-se que as doses de SS no lodo de esgoto alcalinizado adicionado com 2% (0,872% P) e 4% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1,745% P), respectivamente, 13,56 kg FPA e 27,12 kg SS.

2.2) Cálculo da quantidade de superfosfato simples (SS) para suprir 2 kg de  $P_2O_5$  (2%  $P_2O_5$ ):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 14,74\% P_2O_5 \\ x \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 2\% P_2O_5 \\ x = 13,56 \text{ kg SS/1 kg } P_2O_5 \text{ (1\% } P_2O_5) \end{array}$$

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $13,56 \text{ kg SS} = 2\% P_2O_5 \times 0,436 = 0,872\% P$ .

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 2%  $P_2O_5$  (0,436% P) a partir do SS, tem-se na mistura de adição:

**86,44 kg de lodo puro + 13,56 kg de SS = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de SS e de lodo puro na mistura de adição a 2% para suprir recomendação de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de SS na mistura:

$$\begin{array}{l} 13,56 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 2 \text{ kg } P_2O_5 \\ x \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg } P_2O_5 \\ \mathbf{x = 711,9 \text{ kg SS para suprir 105 kg } P_2O_5.} \end{array}$$

b) cálculo da quantidade de fósforo na dose da mistura para suprir 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg LA } 2\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 13,56 \text{ kg SS} \\ x \text{ LA } 2\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 711,9 \text{ kg} \\ \mathbf{x = 5250 \text{ kg de mistura para suprir a dose de } 105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (45,581 kg P).} \end{array}$$

Dessa forma:

**5250 kg de mistura – 711,9 kg SS = 4538,1 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ .**

2.3) Cálculo da quantidade de superfosfato simples (SS) para suprir 4 kg de  $P_2O_5$  (4%  $P_2O_5$ ):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 14,74\% P_2O_5 \\ x \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 4\% P_2O_5 \\ x = 27,12 \text{ kg SS/1 kg } P_2O_5 \text{ (1\% } P_2O_5) \end{array}$$

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $27,12 \text{ kg SS} = 4\% P_2O_5 \times 0,436 = 1,745\% P$ .

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 2%  $P_2O_5$  (0,436% P) a partir do SS, tem-se na mistura de adição:

**72,88 kg de lodo puro + 27,12 kg de SS = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de SS e de lodo puro na mistura de adição a 4% para suprir recomendação de  $105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de SS na mistura:

$$\begin{array}{r} 27,12 \text{ kg SS} \quad \text{_____} \quad 4 \text{ kg } P_2O_5 \\ \quad \quad \quad \times \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg } P_2O_5 \\ \hline \mathbf{x = 711,9 \text{ kg SS para suprir } 105 \text{ kg } P_2O_5.} \end{array}$$

b) cálculo da quantidade de fósforo na dose da mistura para suprir  $105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

$$\begin{array}{r} 100 \text{ kg LA } 2\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 27,12 \text{ kg SS} \\ \quad \quad \quad \times \text{ LA } 2\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 711,9 \text{ kg SS} \\ \hline \mathbf{x = 2625 \text{ kg de mistura para suprir a dose de } 105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (45,581 kg P).} \end{array}$$

Dessa forma:

**2625 kg de mistura – 711,9 kg SS = 1913,1 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de  $105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ .**

APÊNDICE 3 - NÍVEIS DE ADIÇÃO DE FÓSFORO EM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO A PARTIR DE SUPERFOSFATO TRIPLO (14,37% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)

Cálculo da quantidade de superfosfato triplo (ST) para suprir 1 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 44,7\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x = 2,24 \text{ kg ST}/1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ (ou 1 kg P}_2\text{O}_5) \end{array}$$

Ao se transformar P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para P, tem-se: 2,24 kg ST = 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> x 0,436 = 0,436% P.

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, tem-se:

**97,76 kg de lodo puro + 2,24 kg de ST = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de ST e de lodo puro na mistura de adição a 1% para suprir recomendação de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>:

a) cálculo da quantidade de ST na mistura:

$$\begin{array}{l} 2,24 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 1 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \\ \mathbf{x = 235,2 \text{ kg ST para suprir 105 kg P}_2\text{O}_5.} \end{array}$$

b) cálculo da quantidade de lodo puro na mistura:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg LA } 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \quad \text{_____} \quad 2,24 \text{ kg ST} \\ x \text{ kg LA } 1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \quad \text{_____} \quad 235,2 \text{ kg ST} \\ \mathbf{x = 10500 \text{ kg de mistura para suprir a dose de 105 kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \text{ (45,581 kg P).} \end{array}$$

Dessa forma:

**10500 kg de mistura – 235,2 kg ST = 10264,8 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>.**

3.2) Cálculo da quantidade de superfosfato triplo (ST) para suprir 2 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (1% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 44,7\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 2\% \text{ P}_2\text{O}_5 \\ x = 4,48 \text{ kg ST}/1\% \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ (ou 2 kg P}_2\text{O}_5) \end{array}$$

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $4,48 \text{ kg ST} = 2\% P_2O_5 \times 0,436 = 0,436\% P$ .

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 2%  $P_2O_5$ , tem-se:

**95,52 kg de lodo puro + 4,48 kg de ST.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de ST e de lodo puro na mistura de adição a 2% para suprir recomendação de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de ST na mistura:

$$\begin{array}{l} 4,48 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 2 \text{ kg } P_2O_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg } P_2O_5 \end{array}$$

**x = 235,2 kg ST para suprir 105 kg  $P_2O_5$ .**

b) cálculo da quantidade da mistura:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg LA } 1\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 4,48 \text{ kg ST} \\ x \text{ kg LA } 1\% P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 235,2 \text{ kg ST} \end{array}$$

**x = 5250 kg de mistura para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$  (45,581 kg P).**

Dessa forma:

**5250 kg de mistura – 235,2 kg ST = 5014,8 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$ .**

3.3) Cálculo da quantidade de superfosfato triplo (ST) para suprir 4 kg de  $P_2O_5$  (4%  $P_2O_5$ ):

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 44,7\% P_2O_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 4\% P_2O_5 \end{array}$$

**x = 8,96 kg ST/1%  $P_2O_5$  (ou 2 kg  $P_2O_5$ )**

Ao se transformar  $P_2O_5$  para P, tem-se:  $8,96 \text{ kg ST} = 2\% P_2O_5 \times 0,436 = 0,436\% P$ .

Adicionando-se no lodo de esgoto alcalinizado (LA) 4%  $P_2O_5$ , tem-se:

**91,04 kg de lodo puro + 8,96 kg de ST = 100 kg de mistura.**

A partir disso, calculou-se a quantidades de ST e de lodo puro na mistura de adição a 4% para suprir recomendação de 105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ :

a) cálculo da quantidade de ST na mistura:

$$\begin{array}{l} 8,96 \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 4 \text{ kg } P_2O_5 \\ x \text{ kg ST} \quad \text{_____} \quad 105 \text{ kg } P_2O_5 \\ \mathbf{x = 235,2 \text{ kg ST para suprir 105 kg } P_2O_5.} \end{array}$$

b) cálculo da quantidade da mistura:

$$\begin{array}{l} 100 \text{ kg LA 4\% } P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 8,96 \text{ kg ST} \\ x \text{ kg LA 4\% } P_2O_5 \quad \text{_____} \quad 235,2 \text{ kg ST} \\ \mathbf{x = 2,625 \text{ kg de mistura para suprir a dose de } 105 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ } ha^{-1} \text{ (45,581 kg P).} \end{array}$$

Dessa forma:

**2,625 kg de mistura – 235,2 kg ST = 2389,8 kg de lodo puro na mistura de adição para suprir a dose de 105 kg de  $P_2O_5$   $ha^{-1}$ .**

**Observação:** os valores acima calculados para um hectare (2000000 de kg médios de solo da camada arável) encontram-se na tabela 6 e foram calculados para vasos de  $3 \text{ dm}^{-3}$  contendo 2,5 kg de solo peso seco (tabela 7).

APÊNDICE 4 - TABELA DE ANÁLISES DE VARIÂNCIA DO EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO REFERENTE AOS DADOS QUÍMICOS DE SOLO E FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

Causa de Variação	GL <sup>1</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	pH SMP	H + Al	Al	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	P Mehlich-1	P acumulado
				----- (cmolc dm <sup>3</sup> ) -----				(mg kg <sup>-1</sup> )	(g vaso <sup>-1</sup> )
<sup>2</sup> NAP	3	0,941**	0,602**	16,941**	4,052**	6,356**	2,574**	47,971**	0,220**
<sup>3</sup> FAP	2	0,056**	0,030*	0,806*	0,126**	1,802**	1,681**	26,344**	0,05 <sup>ns</sup>
N x F	6	0,016 <sup>ns</sup>	0,017 <sup>ns</sup>	0,558 <sup>ns</sup>	0,025 <sup>ns</sup>	0,387**	0,266**	6,033**	0,013 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,009	0,008	0,239	0,012	0,017	0,046	0,084	0,024
<sup>5</sup> CV (%)		2,19	1,65	7,05	12,76	8,64	16,49	5,35	15,64
χ <sup>2</sup>		8,03 <sup>ns</sup>	10,62 <sup>ns</sup>	13,938 <sup>ns</sup>	9,922 <sup>ns</sup>	18,59 <sup>ns</sup>	14,044 <sup>ns</sup>	12,575 <sup>ns</sup>	17,136 <sup>ns</sup>

\*\* Muito significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns: não significativo

P absorvido: fósforo absorvido acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro

<sup>1</sup>GL: graus de liberdade

<sup>2</sup>NAP: nível de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>3</sup>FAP: fonte de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>4</sup>N x F: interação de fatores níveis e fontes de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>5</sup>CV (%): coeficiente de variação em percentagem

χ<sup>2</sup>: qui-quadrado do teste de Bartlett

APÊNDICE 5 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE pH CaCl<sub>2</sub> NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

NAP (%)					
FAP	0	0,436	0,872	1,745	MÉDIA
----- pH CaCl <sub>2</sub> -----					
FPA	4,525	4,575	4,17	3,975	4,312 a
SS	4,450	4,350	4,100	3,900	4,200 b
ST	4,475	4,625	4,100	3,950	4,287 a
MÉDIA	4,483 A	4,517 A	4,125 B	3,942 C	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 6 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ALUMÍNIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

NAP (%)					
FAP	0	0,436	0,872	1,745	MÉDIA
----- Al trocável (cmolc dm <sup>-3</sup> ) -----					
FPA	0,225	0,275	1,000	1,475	0,744 a
SS	0,325	0,575	1,050	1,700	0,913 b
ST	0,425	0,425	1,125	1,525	0,875 b
MÉDIA	0,325 A	0,425 A	1,058 B	1,567 C	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 7 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ACIDEZ POTENCIAL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- H + Al (cmolc dm <sup>-3</sup> )-----				
FPA	5,800	5,800	6,825	8,250	6,669 a
SS	6,025	6,100	7,100	9,075	7,075 a
ST	6,325	5,925	7,800	8,100	7,037 a
MÉDIAS	6,050 A	5,942 A	7,242 B	8,475 C	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 8 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE CÁLCIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Cálcio trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )-----				
FPA	2,900 aA	2,275 aB	1,77 aC	0,525 bD	1,869
SS	1,900 bA	1,575 cB	0,92 bC	0,450 bD	1,212
ST	2,000 bA	1,850 bB	0,900 bC	0,925 aC	1,419
MÉDIAS	2,267	1,900	1,200	0,633	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 9 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE MAGNÉSIO TROCÁVEL NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Mg trocável (cmolc dm <sup>-3</sup> )-----				
FPA	1,050 bAB	1,425 bA	0,550 bC	0,825 aBC	0,963
SS	1,825 aB	2,325 aA	1,475 aB	0,800 aC	1,606
ST	1,725 aA	1,725 b A	1,227 aB	0,725 aC	1,351
MÉDIA	1,533	1,825	1,084	0,783	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 10 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- P Mehlich-1 ( mg dm <sup>-3</sup> )-----				
FPA	2,300 bB	7,025 bA	6,500 aA	7,150 aA	5,744
SS	3,325 aC	9,600 aA	6,725 aB	6,425 bB	6,519
ST	2,950 abB	6,600 bA	3,600 bB	2,900 cB	4,012
MÉDIAS	2,858	7,742	5,608	5,492	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 11 - TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FOSFORO

Causa de Variação	GL	QM
NAP	3	36,849**
Extratores	1	45,840**
Interação N x E	3	0,377 <sup>ns</sup>
Erro	24	0,147
CV (%)	5,51	
$\chi^2$	7,087	

\* = significativo a 1% de probabilidade

\*\* = significativo a 5% de probabilidade

$\chi^2$  = qui-quadrado do teste de Bartlett

CV (%) = coeficiente de variação, em percentagem

NAP = nível de adição de P, em percentagem

GL = grau de liberdade

QM = quadrado médio do erro

APÊNDICE 12 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 E RESINA TROCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DE ARAPOTI-PR FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

Extrator	NAP (%)				Médias
	0%	2,300	5,250	8,425	
Mehlich-1	2,300	7,050	8,675	9,675	5,756 b
Resina	5,250	9,000	8,675	9,675	8,150 a
Médias	3,775 C	8,025 AB	3,775 B	8,425 A	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

APÊNDICE 13 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO (%) NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- P acumulado (%)-----				
FPA	0,728	1,042	1,018	0,953	0,935
SS	0,745	1,100	1,088	0,995	0,982
ST	0,943	1,192	1,088	0,962	1,046
MÉDIA	0,805 B	1,112 A	1,064 A	0,970 AB	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 14 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO DE ARAPOTI-PR REFERENTES AOS DADOS DE ALTURA DE PLANTAS, PRODUÇÃO GRÃOS E MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

Fonte de Variação	GL	Altura de Plantas (cm)	Grãos (g vaso <sup>-1</sup> )	MSTPA (g vaso <sup>-1</sup> )
NAP <sup>1</sup>	3	2,117 <sup>ns</sup>	2,25**	3,974**
FAP <sup>2</sup>	2	1,086 <sup>ns</sup>	3,652**	9,128**
N x F <sup>3</sup>	6	1,183 <sup>ns</sup>	1,598**	2,040**
Erro	36	1,161 <sup>ns</sup>	0,374	0,578
CV (%)		7,57	21,11	11,83
$\chi^2$		14,372 <sup>ns</sup>	9,779 <sup>ns</sup>	9,282 <sup>ns</sup>

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

<sup>3</sup>N x F = interação nível e fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo de fosfato alvorada, superfosfato simples e superfosfato triplo

MSTPA = massa seca total da parte aérea de feijoeiro

APÊNDICE 15 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Produção de grãos (g vaso <sup>-1</sup> )-----				
FPA	2,037 aB	3,740 aA	3,302 aA	3,498 aA	3,144
SS	2,335 aB	3,525 aA	3,968 aA	2,960 aAB	3,197
ST	2,770 aA	2,785 aA	2,140 bA	1,682 bA	2,344
MÉDIA	2,381	3,350	3,137	2,713	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 16 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA (MSTPA) DE FEIJOEIRO NUM LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- massa seca total (g vaso <sup>-1</sup> )-----				
FPA	5,690 aB	7,790 aA	6,770 aAB	6,745 aAB	6,749
SS	5,853 aB	7,407 abA	7,977 aA	6,645 aAB	6,971
ST	6,033 aA	6,188 bA	5,217 bA	4,825 bA	5,566
MÉDIA	5,858	7,128	6,655	6,072	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 17 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO REFERENTES AOS DADOS QUÍMICOS DE SOLO E PERCENTAGEM DE FÓSFORO ACUMULADO NA MASSA SECA TOTAL PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

Causa de Variação	GL <sup>1</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	H + Al	Al trocável	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	P Mehlich-1	P Acumulado
<sup>2</sup> NAP	3	0,382**	21,394**	2,467**	12,414**	0,926**	24,392**	0,35**
<sup>3</sup> FAP	2	0,022 <sup>ns</sup>	2,835**	0,078**	0,00 <sup>ns</sup>	2,543**	12,159**	0,074 <sup>ns</sup>
<sup>4</sup> N x F	6	0,020*	0,796 <sup>ns</sup>	0,008 <sup>ns</sup>	0,280**	0,367**	5,524**	0,021 <sup>ns</sup>
Erro	36	0,008	0,343	0,006	0,035	0,065	0,277	0,014
<sup>5</sup> CV (%)		2,02	6,63	13,08	6,93	15,44	7,75	32,19
χ <sup>2</sup>		13,118 <sup>ns</sup>	8,288 <sup>ns</sup>	7,388 <sup>ns</sup>	8,088 <sup>ns</sup>	10,778 <sup>ns</sup>	19,485 <sup>ns</sup>	15,31 <sup>ns</sup>

\*\* Muito significativo ao nível de 1% de probabilidade

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade

ns: não significativo

P absorvido: fósforo absorvido acumulado na massa seca total da parte aérea de feijoeiro

<sup>1</sup>GL: graus de liberdade

<sup>2</sup>NAP: nível de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>3</sup>FAP: fonte de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>4</sup>N x F: interação de fatores níveis e fontes de adição de lodo de esgoto alcalino com fósforo

<sup>5</sup>CV (%): coeficiente de variação, em percentagem

χ<sup>2</sup>: qui-quadrado do teste de Bartlett

APÊNDICE 18 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE pH CaCl<sub>2</sub> NUM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- pH CaCl <sub>2</sub> -----				
FPA	4,600 aA	4,550 aA	4,325 aB	4,050 aC	4,381
SS	4,475 aA	4,400 aAB	4,300 aBC	4,200 aC	4,344
ST	4,550 aA	4,550 aA	4,375 aB	4,200 aC	4,419
MÉDIA	4,542	4,500	4,333	4,150	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 19 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ALUMÍNIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO-VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FÓSFORO

FAP <sup>2</sup>	NAP (%) <sup>1</sup>				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Al trocável (cmolc dm <sup>-3</sup> ) -----				
FPA	0,225	0,225	0,725	1,175	0,588 a
SS	0,250	0,425	0,775	1,325	0,694 b
ST	0,175	0,275	0,675	1,125	0,563 a
MÉDIA	0,217 A	0,3083 B	0,7250 C	1,208 D	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 20 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE ACIDEZ POTENCIAL (H+Al) EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- H+Al (cmolc dm <sup>-3</sup> ) -----				
FPA	7,25	7,50	9,02	10,70	8,62 a
SS	8,57	8,88	9,35	10,50	9,32 b
ST	7,38	7,38	8,85	10,70	8,57 a
MÉDIA	7,73 A	7,92 A	9,07 B	10,63 C	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 21 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE CÁLCIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Cálcio trocável -----				
FPA	3,475 bA	3,575 aA	2,150 bB	1,575 abC	2,631
SS	3,950 aA	3,075 bB	2,500 aC	1,300 bC	2,706
ST	3,875 bA	3,175 bB	2,125 bC	1,625 aD	2,700
MÉDIA	3,683	3,275	2,258	1,500	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 22 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE MAGNÉSIO TROCÁVEL EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Mg trocável (cmolc dm <sup>-3</sup> ) -----				
FPA	2,275 aA	2,050 aA	2,275 aA	1,500 aB	2,025
SS	0,9750 cB	0,9500 bB	1,625 bA	1,375 aAB	1,231
ST	1,650 bB	1,825 aAB	2,150 aA	1,150 aC	1,694
MÉDIA	1,633	1,608	2,017	1,342	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 23 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO EXTRAÍVEL MEHLICH-1 EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO APÓS CULTIVO DE FEIJOEIRO

FAP	NAP (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- P Mehlich-1 (mg dm <sup>-3</sup> ) -----				
FPA	5,425 aC	10,725 aA	7,900 aB	6,400 aC	7,613
SS	4,750 aC	7,225 bB	8,775 aA	6,725 aB	6,869
ST	4,575 aB	6,275 cA	6,450 bA	6,225 aA	5,881
MÉDIA	4,917	8,075	7,708	6,450	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 24 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DE FÓSFORO MEHLICH-1 E RESINA TOCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

Causa de Variação	GL	QM
NAP	3	52,729**
Extratores	1	13,65**
Interação N x E	3	4,522**
Erro	24	0,521
CV (%)	8,69	
$\chi^2$	11,571	

\* = significativo a 1% de probabilidade

\*\* = significativo a 5% de probabilidade

NAP: níveis de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo a partir da fosforita alvorada em percentagem

CV (%): coeficiente de variação, em percentagem

$\chi^2$  = qui-quadrado do teste de Bartlett

APÊNDICE 25 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO MEHLICH-1 E RESINA TOCADORA DE ÍONS EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

	NAP <sup>1</sup> (%)				
Extrator	0%	0,436	0,872	1,745	Média
Mehlich-1	5,425 bC	10,725 bA	8,05 bB	6,4 aC	7,650
Resina	7,675 aC	12,325 aA	10,325 aB	5,5 aD	8,956
Média	6,550	11,525	9,188	5,950	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo, em percentagem

APÊNDICE 26 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE FÓSFORO ACUMULADO (%) NA MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO EM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO FERTILIZADO COM LODO DE ESGOTO ALCALINIZADO ADICIONADO DE DIFERENTES NÍVEIS E FONTES DE FÓSFORO

FAP <sup>2</sup>	NAP <sup>1</sup> (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
----- Fósforo acumulado (%)-----					
FPA	0,440	0,705	0,735	0,726	0,651
SS	0,470	0,850	0,805	0,917	0,761
ST	0,400	1,010	0,720	0,720	0,713
MÉDIAS	0,437 B	0,855 A	0,855 A	0,788 A	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 27 - ANÁLISES DE VARIÂNCIA DE EXPERIMENTO NUM LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR, REFERENTES AOS DADOS DE ALTURA DE PLANTAS, PRODUÇÃO DE MASSA SECA DA PARTE AÉREA, GRÃOS E MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO

Causa de Variação	GL	Altura de Plantas (cm)	MSTPA (g vaso <sup>-1</sup> )	Grãos (g vaso <sup>-1</sup> )
NAP <sup>1</sup>	3	0,946 <sup>ns</sup>	5,614**	1,392**
FAP <sup>2</sup>	2	0,322 <sup>ns</sup>	7,001**	3,477**
N x F	6	0,830 <sup>ns</sup>	0,402 <sup>ns</sup>	0,314*
Erro	36	0,529	0,666	0,102
CV (%) <sup>3</sup>		5,44	19,36	21,92
$\chi^2$		16,885*	14,029*	18,233*

\* = significativo a 1% de probabilidade

\*\* = significativo a 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP: = níveis de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo a partir de diferentes níveis e fontes de fósforo, em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fontes de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

<sup>3</sup>CV (%): coeficiente de variação, em percentagem

$\chi^2$  = qui-quadrado do teste de Bartlett

APÊNDICE 28 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE GRÃOS DE FEIJOEIRO CULTIVADO NO LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR

FAP <sup>2</sup>	NAP <sup>1</sup> (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- Produção de grãos (g vaso <sup>-1</sup> )-----				
FPA	0,805 bB	1,745 aA	2,007 aA	1,462 aA	1,505
SS	1,603 aB	1,865 aAB	2,227 aA	1,875 aAB	1,893
ST	0,560 bB	1,545aA	0,862 bB	0,890 bB	0,964
MÉDIA	0,989	1,718	1,699	1,409	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

APÊNDICE 29 - COMPARAÇÃO DE MÉDIAS DE PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA DE FEIJOEIRO CULTIVADO NO LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO DISTRÓFICO DE CONTENDA-PR

FAP <sup>2</sup>	NAP <sup>1</sup> (%)				MÉDIA
	0	0,436	0,872	1,745	
	----- massa seca total (g vaso <sup>-1</sup> )-----				
FPA	2,982	4,263	4,565	4,345	4,039 b
SS	3,805	5,28	5,388	5,32	4,948 a
ST	2,815	4,54	3,505	3,785	3,661 b
MÉDIA	3,201 B	4,694 A	4,486 A	4,483 A	

**Nota:** Médias seguidas de mesma letra minúscula na vertical e maiúsculas na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

<sup>1</sup>NAP (%) = nível de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo em percentagem

<sup>2</sup>FAP = fonte de adição de lodo de esgoto alcalinizado com fósforo

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C.A. **Nitratos e metais pesados no solo e em plantas de *Eucalyptus grandis* após aplicação de biossólido da ETE de Barueri.** 1999. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1999.
- ANDREOLLI, C.V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema.** Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1999. 278p. (Tese de Doutorado).
- ANJOS, A.R.M.; MATTIAZZO, M.E. **Metais pesados em plantas de milho cultivadas em LATOSSOLOS repetidamente tratados com biossólido.** Scientia Agrícola, v.57, p.769-776, 2000.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J.M.; RIBEIRO, A.C. **Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 7, n. 2, p. 243-249, 1983.
- BARBOSA, G.M.C.; TAVARES FILHO, J.; FONSECA, I.C.B. **Avaliações de propriedades físicas de um eutroférico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos.** Sanare, Curitiba, v.17, n.17, p.94-101, 2002a.
- BARROW, N.J. **Reaction of anions and cations with variable-charge soils.** Advances in Agronomy., 38:183-230, 1985.
- BELTRÁN, R.R., SILVEIRA, R. I.; PASSOS, M.J. **Disponibilidade de fósforo para plantas de arroz avaliada por extratores químicos.** Scientia agrícola, v. 55 n. 2, Piracicaba, 1998.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S.; BATAGLIA, O.C. **Peletização de lodo de esgoto e adição de CaCO<sub>3</sub> na produção de matéria seca e absorção de Zn, Cu e Ni pelo milho em três latossolos.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.21, p. 685-691, 1997.
- BERTON, R.S.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.13, p.187-192, 1989.
- BISCAIA, R.C.M.; MIRANDA, G. **Uso do lodo de esgoto calado na produção de milho.** Sanare, Curitiba, v.5, p. 86-89, 1996.
- BOLAN, N.S.; ELLIOTT, J.; GREGG, P.E.H.; WEI, S. **Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rizosphere.** Biology and Fertility of Soils, v. 24, p. 169-74, 1997.
- BRANCO, S.M. **Hidrobiologia aplicada à engenharia sanitária.** 2. ed. São Paulo: CETESB, 1978. 620 p.

BRASIL. Leis, decretos, etc. Portaria nº 01, de 04 de mar. de 1983. **Diário Oficial da União**, Brasília, 09 de mar. de 1983.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Laboratório Nacional de Referência Vegetal. **Análise de corretivos, fertilizantes e inoculantes**. Brasília, LANARV; 1988. 104p.

BRASIL, C ; MURAOKA, T. **Comparação de extratores de fósforo em solos da Amazônia Central**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 25, Viçosa, resumos expandidos SBCS/UFV, 1995, Viçosa, 1995. v. 2. p. 980-982.

BRASIL. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Inspeção e Fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura: Legislação**. Divisão de Fiscalização de corretivos e fertilizantes, 1983. 88 p.

BURNHAM, J.C.; HATFIELD, N.L. **Pathogens in sludge: Bacteria - A commentary on treatment stabilization and technology**. Paper presented at the WEF Seminar on Pathogens in Sludge: What Does It Means? New Orleans, September. 1992.

BURNHAM, J.C. **Cement kiln dust/lime treatment of municipal sludge cake: alternative methods for microbial and odor control**. 18<sup>th</sup> Municipal sewage treatment plant sludge management symposium. HMCRI. Palm Beach, EUA. pp. 29-32.1988.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T.J. **Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian oxisols**. Journal Soil Science Society Of America, Madison, v.55, p.1407-1413, 1991.

CATCHCART, J.B.; World phosphate reserves and resources.; In: **The role of phosphorus in agriculture**.; U.S. Geological Survey.; Denver, Colorado, 1980.

CAVALLARO, N.; PADILLA, N.; VILLARRUBIA, J. **Sewage sludge effects on chemical properties of acid soils**. Soil Science., 156:63-70, 1993.

CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. **Recomendações para uso de corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais**., 5<sup>a</sup> Aproximação.Viçosa, 1999. 359p.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L.; **Agronomic evaluation of partially acidulated phosphate rocks in the tropics**: IFDC experience, IFDC-P-7. International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, Alabama, 1988.

CHIEN, S.H.; van KAUWENBERGH, S.J. **Chemical and mineralogical characteristics of phosphate rock for direct application**. In: FIRST NATIONAL SEMINAR ON PHOSPHATE ROCK IN AGRICULTURE, p. 3-31, (R. Campillo, ed.). Serie Carillanca No. 29, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Temuco, Chile, 1992.

CHIEN S.H., MENON, R.G.; BILLINGHAM, K.S. **Estimation of phosphorus availability to maize and cowpea from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus.** Soil Science Society of America Journal, 60: 1173–1177, 1996.

CHIEN, S.H.; FRIESEN D.K. Phosphate rock for direct application. In: **Future Directions for Agricultural Phosphorus Research.** TVA Bulletin, Y-224, Muscle Shoals, USA, 1992.

CHIEN, S.H., SALE, P.W.G., FRIESEN, D.K. **A discussion of the methods for comparing the relative effectiveness fo phosphate fertilizers varying in solubility.** Fertiliser Research, The Hague, v. 24, p. 149-157, 1990a.

CHRISTIE, P.; EASSON, D.L.; PICTON, J.R. e LOVE, S.C.P. **Agronomic value of alkaline-stabilized sewage biosolids for spring barley.** Agronomy Journal, v. 93, p. 144-151, 2001.

CIAT. CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE AGRICULTURA TROPICAL. **Bean production systems;** highlights in 1975. Cali,1975. (Annual report).

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; ERNANI, P.R.; ALBUQUERQUE, J. **Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto.**; Ciência Rural, v. 33, n.6, Santa Maria, 2003.

CLAPP, C. E., STARK, S. A., CLAY, D. E., LARSON, W. E., **Sewage sludge organic matter and soil properties.** In: CHEN, Y. e AVNIMELECH, Y., eds. The role of organic matter in modern agriculture. Dordrecht, Martinus nijhoff, 1986. p. 209-253.

COBRA NETO, A. **Absorção e deficiências dos macronutrientes pelo feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), var. roxinho.** Tese (Doutorado): ESALQ, Piracicaba, 1967. 69 p.

CORRÊA, R.S. **Efficiency of five biosolids to supply nitrogen and phosphorus to ryegrass.**; Pesquisa agropecuária brasileira.; Brasília, v.39, n.11, p.1133-1139, 2004.

CQFS - SC/RS - **Comissão de Química e Fertilidade do Solo,** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004.

CRUZ, E.R.; SANTOS, J.C.; TORQUATO, E.M.; PENTEADO, B.B.; SANTOS, C.H. dos e GRASSI FILHO, H. **Fertilidade do solo manejado com bio sólido e água residuária.** In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25, 2002, Rio de Janeiro-RJ, **Anais...**,Rio de Janeiro: SBCS. 2002, CD ROM.

DA ROS, C.O.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; FRIES, M. R. **Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 17, p. 257-261, 1993.

DEFELIPO, B.V.; NOGUEIRA, A.V.; LOURES, E.G.; ALVAREZ, V.V.H. **Eficiência agrônômica do lodo de esgoto proveniente de uma siderúrgica.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, p. 389-393, 1991.

DROSTE, R.L. **Theory and practice of water and wastewater treatment.** Wiley and sons, New York, USA, 1997. 800 p.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de classificação de solos.** Brasília: Embrapa. Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 26, 412p. : II. 1999.

EMPRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná,** por Jorje Olmos I. Larach, Alcides Cardoso, Américo Pereira de Carvalho, Delcio Peres Hochmicles, Pedro Jorge Fasolo e Moacyr de Jesus Rauem. Curitiba, Embrapa - SNLCS/SUDESUL/IAPAR, 1984. 2 t. ilustr. (Embrapa - SNLCS. Boletim Técnico, 57).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise física de solos.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição Mineral de Plantas: princípios e perspectivas/Emanuel Epstein e Arnold J. Bloom.** Tradução de Maria Edna Tenório Nunes, 2º ed., Editora Planta., Londrina, 2006. 403 p.

FAGERIA, V.D. **Nutrient interactions in crop plants.** Journal of Plant Nutrition, v.24, p.1269-1290, 2001.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; STONE, L.F. Nutrição de fósforo na produção de feijoeiro. In: Tsuioshi Yamada; Silvia regina Stipp e abdalla. (Org.). **Fósforo na agricultura brasileira.** Piracicaba: Associação Brasileira para pesquisa potassa e fosfato, p. 435-455, 2004.

FAGERIA, N.K.; **Eficiência de uso de fósforo pelos genótipos de feijão.,** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.2, n.2, p.128-131, Campina Grande, 1998.

FAGERIA, N.K. **Maximizing crop yields.** New York: Marcel Dekker, 1992. 274p.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil.** Santo Antonio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 42p. Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 92, 1999.

FAO. **Agricultural data.** Disponível em: <http://www.faostat.fao.org/faostat/2003>  
Acesso em: novembro de 2003.

FAVARETTO, N.; DESCHAMPS, C. **Efeito do lodo complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol.** Sanare, v. 8, p. 33-38, 1997.

FIA, R.; MATOS, A.T.; AGUIRRE, C.I. **Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caledado.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v. 13, n. 4, 287-299, 2005.

FONTAINE, F. L. **The priming effect of organic matter: A question of microbial competition?** Soil Biology and Biochemistry, v. 35, p. 837-843, 2003.

FONTAINE, F.; MARIOTTI, A. e ABBADIE, L. **The priming effect of organic matter: A question of microbial competition?** Soil Biology and Biochemistry, v. 35, p. 837-843, 2003.

FONTES, M.P.F. e WEED, S.B. **Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy.** Geoderma, v. 72, p. 37-51, 1996.

FROSSARD, E.; SINAJ, S.; ZHANG, L. M.; MOREL, J.L.; **The fate of sludge phosphorus in soil-plant systems.** Soil Science Society of America Journal, v. 60, p. 1248-1253, 1996.

GLASS, A.D.M.; BEATON, J.D.; BOMKE, A. **The role of phosphorus in plant nutrition.** Calgary: Western Canada Phosphate Symposium, 1980.

GOEDERT, W.; LOBATO, E. **Eficiência agrônômica de fosfatos em solos de cerrado.**, Pesq. Agropec. Brasileira, v. 15 (3), p. 311-318, Brasília, 1980.

GOEDERT, W.J. **Solos dos cerrados - Tecnologias e estratégias de manejo.** São Paulo: EMBRAPA/NOBEL, 1986.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. **Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto.**, Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 30, p.267-280, 2006.

HAAG, H.P.; MALAVOLTA, E. **Absorção de nutrientes pela cultura do feijoeiro.**; Bragantia, v.26,p.381-391, 1967.

HAYNES, R.J. **Lime and phosphate in the soil-plant system.** Advances in Agronomy, v.37, p.249-315, 1984.

HAYNES, R.J.; MOKOLOBATE, M.S. **Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved.** Nutrient Cycling in Agroecosystems, Dordrecht, v.59, p. 47-63, 2001.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 499 p.

HEIL, D.M., BARBARICK, K.A. **Water treatment sludge influence on the growth of sorghum-sudangrass**. *Journal of Environmental Quality*, v. 18, p. 292-8, 1989.

HOROWITZ, N.; MEUER, E.J. Eficiência agrônômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ADDALLA, S. R. S. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**. 1., 2004, Piracicaba. *Anais*. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.666-667.

HUE, N.V. **Effects of organic acids/anions on phosphorus sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies**. *Soil Science*, v. 152, p. 463-471, 1991.

HUE, N.V. **Interaction of  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  applied to an Oxisol and previous sludge amendment: soil and crop response**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 21, p. 61--73, 1990.

HUE, N.V. **Correct soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure**. *Communications in soil science and plant analysis*. v. 23, p. 241-264.1992.

HUE, N. V., CRADDOCK, G. R, ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 50, p. 28-34, 1986.

HUE, N.V. AMIEN, I. **Aluminium detoxification with green manures**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 20, p. 1499–1511, 1989.

HUE, N.V. Sewage sludge. In: RECHCIGL, J.E., ed. **Soil amendments and environmental quality**. Boca Raton, CRC Press, 1995. p.199-168.

HUE, NV. **Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge**. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 23, p. 241–264, 1992.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. & BAHAM, J. **Organic amendments and phosphorus dynamics: Phosphorus chemistry and sorption**. *Soil Science.*, v. 161, p. 426-435, 1996.

JONES Jr, J.B. e CASE, V.W. **Sampling, Handling, and Analyzing Plant Tissue Samples**. Pp. 389-427. In: R.L. Westerman; J.V. Baird; N.W. Christensen; P.E. Fixen and D.A. Whitney. In: **Soil testing and plant analysis**. Madison, Soil Science Society of America, Inc, 1990.

KAMPRATH, E.J., WATSON, M.E. Conventional soil tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, E.E., SAMPLE, E.C., KAMPRATH, E.J. (eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison : ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.433-469.

KIKUTI, K. **Teores de macronutrientes no feijoeiro em função de nitrogênio e de fósforo.** Disponível em: <http://www.cnpaf.embrapa.br/conafe/pdf/conafe2005-0237.pdf> Acesso em: 16/07/2007.

KIRKHAM, M.B. **Agricultural use of phosphorus in sewage sludges.** Advances in Agronomy, v. 35, p.129-163, 1982.

KOEPPEN, W. **Climatologia: un estudio de los climas de la Tierra.** México: Fundo de Cultura Economica. México, 1948. 478p.

LINDSAY, B.J.; LOGAN, T.J. **Field response of soil physical properties to sewage sludge.** Journal of Environmental Quality, v.27, p.534-542, 1998.

LITTLE, D. A.; RENEAU, J. R. R. B.; MARTENS, D. C. **Lime-stabilized and chemically fixed sewage sludges as lime amendments.** Bioresource Technology, v. 37, p. 93-102, 1991.

LOGAN, T.J.; LINDSAY, B. J.; GOINS, L. E.; RYAN, J. A. **Field assessment of sludge metal bioavailability to crops: sludge rate response.** Journal of Environmental Quality, v.26, p.534-550, 1997.

LOGAN, T.J.; HARRISON, B.J. **Physical characteristics of alkaline stabilized sewage sludge (N- Viro Soil) and their effects on soil physical properties.** Journal of Environmental Quality, v. 24, p. 153-164, 1995.

LOURENÇO, R.S.; ANJOS, A.R.M.; MEDRADO, M.J.S. **Efeito do lodo de esgoto na produtividade de milho e feijão no sistema de produção de bracinga.** Sanare, Curitiba, v.5, p.90-92, 1996.

LUCCHESI, L.A.C.; LACERDA, A.C.B.M.; PORTUGAL, S.A.S.; SALVADOR, J.T. **Curitiba: reciclagem agrícola de lodo de esgoto tratado pelo Processo N-Viro.** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, ICTR - Instituto de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável - Florianópolis, 2004.

McLEAN, E.O. e WHEELER, R.W.C. **Partially acidulated rock phosphate as a source of phosphorus to plants.** I. Growth chamber studies. Soil Sci Am Proc. v.28, p. 545-550, 1964.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas: amostragem, interpretação e sugestões de adubação.** São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124p.

MALAVOLTA, E. **Deficiências de macro e micronutrientes e toxidez de Cl, Mn e Al no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.).** Piracicaba: USP-ESALQ. Mimeografado. Apostila utilizada na disciplina "Solos e Nutrição de Plantas" do curso de pós-graduação; 1980. 14p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Fertilizing for high yield sugarcane**: nutrient and fertilizer management in sugarcane. Basel: I.P.I., 1994. 104p. (Bulletin, 14).

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição mineral de plantas.**, Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E. **O fósforo na planta e interações com outros elementos**. In: SIMPÓSIO DE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2003, São Pedro. Fósforo na Agricultura Brasileira. Piracicaba SP : Potafós, 2003.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic, 1995. 889p.

MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, J.G.; SOUZA, R.B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Eds). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5a. Aproximação, Comissão de Fertilidade do Estado de Minas Gerais-CFSEMG, Viçosa, 1999, p.143-168.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G. **Efeito das doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.18, p.449-455, 1994.

MELO, W.J. e MARQUES, M.O. **Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas**. In: BETTIOL, W. e CAMARGO, O.A., eds. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p.109-141.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G. e CHELLI, R.A. **Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. Revista Brasileira Ciência do Solo, 18:449-455, 1994.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SILVA, F.C. e BOARETTO, A.E. **Uso de resíduos sólidos urbanos na agricultura e impactos ambientais**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Palestras. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

MIRANDA, L.N., AZEVEDO, J. A., MIRANDA, J.C.C., GOMES, A.C. **Calibração de métodos de análise de fósforo e resposta do feijão ao fósforo no sulco.**, Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 37, n. 11, p. 1621-1627, 2002.

MOREIRA, A. e MALAVOLTA, E. **Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, p. 1519 -1527, 2001.

MOREIRA, A., ALMEIDA, M.P.; COSTA, D.G., SANTOS, L.S. **Acidez potencial pelo método do pH SMP no Estado do Amazonas.**, Pesquisa Agropecuária Brasileira., Brasília, v. 39, n.1, p. 89-92, 2004.

MOREIRA, A., MALAVOLTA, E., CARDOSO MORAES, C.M., **Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em latossolo amarelo.**, Pesquisa Agropecuária Brasileira., Brasília, v. 37, n. 10, p. 1459-1466, 2002.

MOREIRA., EURÍPEDES MALAVOLTA., **Fontes, doses e extratores de fósforo em alfafa e centrosema.**, Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, n. 12, p. 1519-1527, dez. 2001.

MUNOZ HERNANDEZ, R.J. SILVEIRA, R.I. **Efeitos da saturação por bases, relações Ca:Mg no solo e níveis de fósforo sobre a produção de material seco e nutrição mineral do milho (zea mays l.).**, Scientia agricola.v. 55 Piracicaba Jan./Apr. 1998.

MUZZILI, O. Adubação fosfatada no Estado do Paraná. In: OLIVEIRA, A.; LOURENÇO, S.; GOEDERT, W. J. (Ed.). **Adubação fosfatada no Brasil.** Brasília: Embrapa- DID, 1982. p. 61-101.

NAKAYAMA, L.H.I., CACERES, N.T., J.C. ALCARDE, J.C., MALAVOLTA, E. **Eficiência relativa de fontes de fósforo de diferentes solubilidades na cultura do arroz.**, Scientia agric. v. 55 n. 2, Piracicaba, 1998.

NASCIMENTO, C.W.A., BARROS, D.A.S., MELO, E.E.C., OLIVEIRA, A.B., **Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto.**, Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28 n. 2, Viçosa, 2004.

NICHOLAIDES, J.J.; SANCHEZ, P.A.; BANDY, D.E.; VILLACHICA, J.H.; COUTU, A.J.; VALVERDE, C.S. **Crop production systems in the Amazon Basin.** In: MORAN, E. (ed.). The Dilemma of Amazonian Development, Westview, p.101-153, 1983.

NISHIMURA, A.H.; LUCCHESI, L.A.C.; **Distribuição de fósforo em um Cambissolo Háplico sob plantio direto com a aplicação superficial de biossólido alcalinizado.**; Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná.; 2002. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo).

NOVAIS, R.F.; SMITH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais.** 1º edição. Ed. da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

OBERLE, S.L.; KEENEY, D.R. Interactions of sewage sludge with soil-crop-water systems. In: WEL, C.E.C.; DOWDY, R.H. (Ed.). **Sewage sludge: land utilization and the environment.** Madison: Soil Science Society of America, 1994. p.17-20.

OLIVEIRA, F.C.; MATTIAZZO, M.E.; MARCIANO, C.R., ROSSETO, R. **Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em um Latossolo Amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: Carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 505-519, 2002.

OLIVEIRA, I.P., THUNG, M.D.T. **Nutrição Mineral.**, In: Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade., Associação brasileira da pesquisa da potassa e do fosfato., M. J. de O. Zimmerman., M. Rocha e T. Yamada (edits)., Piracicaba, SP, 1988. 589 p.

OLSEN, S.R.; KHASAWNEH, F.E. Use and limitations of physical-chemical criteria for assessing the status of phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLES, E.C.; KAMPATH, E.J. (Coords.). **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: American Society of Agronomy, 1980. p. 361-410.

OSZTOICS, CSATHÓ, NÉMETH, BACZÓ, MAGYAR, M. **Influence of phosphate fertilizer sources and soil properties on trace element concentrations of red clover.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 36 (4-6), p. 557, 2005.

PARFITT, R.L. **Anion adsorption by soils and soil materials.** Advances in Agronomy., v. 30, p. 1-50, 1978.

PARRA, M.S.; MIRANDA, G.M. **Uso de fertilizantes na cultura do feijoeiro.** In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Uso de fertilizantes na agricultura paranaense.** Londrina: IAPAR, 1980. p. 55-60. Circular,16.

PAULETTI, V., **Nutrientes: teores e interpretações.** 2. ed. Castro: Autor, 2004. v.1. 86 p.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCALER, D.C. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade.**, Londrina: IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular,76).

PAVAN, M.A.; CHAVES, J.C.D.A. **Alterações nas frações de fósforo no solo associadas com a densidade populacional do cafeeiro.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 20 (2): 257-264, 1996.

PEDROZA, J. P.; HAANDEL, A. C. van.; BELTRÃO, N. E. de M.; DIONÍSIO, J. A. **Produção e componentes do algodoeiro herbáceo em função da aplicação de bio sólidos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 483-488, set./dez. 2003.

PEREIRA, M.G.; EBELING, A.G.; SOUZA, G. **Estimativa da acidez potencial pelo método do pH SMP em solos com elevado teor de matéria orgânica.**, Bragantia v. 65 n. 3, p. 487-493, Campinas, 2006.

PÉREZ, O.; MELGAR, M.; LAZCANO-FERRAT, I. **Phosphorus Fertilization and Phosphorus-Extraction Method Calibration for Sugarcane Soils.**; Better Crops International, v. 17, n. 2, 2003.

PITTA, G.V. **Cultivo do Sorgo.**, Disponível em: [http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo\\_2ed/adubacao\\_calagem.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivodoSorgo_2ed/adubacao_calagem.htm). Acesso em: 13/07/2007.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agrônômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**. 1., 2004, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 606-609.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van; MALAVOLTA, E. **Alternative use of the SMP-buffer solution to determine lime requirement of soils.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v.16, p. 245-260, 1985.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, N.M. da. **Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, New York, v.17, p.547-566, 1986.

RAIJ, B. van e VAN DIEST, A. **Utilization of phosphate from different sources by six plant species.** Plant and Soil, v. 51, p. 577-589, 1979.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo.** Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1981. 142p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do Solo e adubação.**; São Paulo, Agrônômica Ceres, 1991.

RAIJ, B. van. **Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos.** Revista brasileira de ciência do Solo, Campinas, v. 2, p. 1-9, 1978.

RAIJ, B. van; J.C. DE ANDRADE, J.C.; H. CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade do solos tropicais**; ed. por B. van Raij; Campinas, Instituto Agrônômico, 2001.

RAIJ, B.van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. **Análise química do solo para fins de Fertilidade.** Campinas: Fundação Cargill, 1987.

RAJAN, S.S.S.; WATKINSON, J.H.; SINCLAIR, A.G. **Phosphate rocks for direct application to soils.** Advances in Agronomy, San Diego, v.57, p.78-159, 1996.

REDDY, C.K.; NYAKATAWA, E.Z.; REEVES., D.W. **Tillage and Poultry Litter Application Effects on Cotton Growth and Yield.** Agronomy Journal, v. 96, p. 1641-1650, 2004.

ROBINSON, J.S., SYERS, J.K., BOLAN, N.S. **A simple conceptual model for predicting the dissolution of phosphate rock in soils.**, Journal Science Food Agriculture., v. 64, p. 397-403, 1994.

ROSSI, C.; ANJOS, A.R.M.; CAMARGO, M.S.; WEBER, O.L.S.; IMHOFF, S.; MALAVOLTA, E. **Efeito residual de fertilizantes fosfatados para o arroz: Avaliação do fósforo na planta e no solo por diferentes extratores.** Scientia Agrícola, v. 56 (1), p. 39-46 , 1999.

SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Coords.). **The role of phosphorus in agriculture.** Madison: American Society of Agronomy, 1980. p.361-410.

SANCHEZ, P.A.; UEHARA, G. Management considerations for acid soils with high phosphorus fixation capacity. *In: KHASAWNEH, F.E. et al. (Ed.). The role of phosphorus in agriculture.* Madison: ASA, 1980. p.471- 514.

SANEPAR. **Companhia de Saneamento do Paraná: Manual Técnico para Utilização Agrícola do lodo de esgoto no Paraná**, 1997. 96 p.

SANYAL, S.K.; De DATTA, S.K. **Chemistry of phosphorus transformations in soil.** Advances in Soil Science, New York, v.16, p.1-120, 1991.

SHARPLEY, A.N. **Phosphorus cycling in unfertilized and fertilized agricultural soils.** Soil Science Society of America Journal, v. 49, p. 905–911, 1985.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R.S.; ZOTELLI, H.B.; PEIXE, C.A.; MENDONÇA, E. **Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.33, n.1, p.1-8, 1998.

SILVA, F.C., BOARETTO, A. E., BERTON, R. S. **Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana de açúcar.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, V. 36, n. 5, p. 831-840.; 2001.

SILVA, F.C.; BOARETTO, A.E.; BERTON, R.S. **Características agrotecnológicas, teores de nutrientes e de metais pesados em cana-de-açúcar (soqueira), cultivada em solo adubado com o lodo de esgoto.** In: XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Viçosa. Anais...Viçosa: SBCS/UFV, 1995. p. 2279-2287.

SILVA, F.C.; RAIJ, B.van. **Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em amostras de solos cultivados com cana-de-açúcar.**, Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 20, p. 83-90, 1996.

SILVA, F. C., RAIJ, B. van. **Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 34, n. 2, p. 267-288, 1999.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; SHARMA, R.D. Alternativa agronômica para o biossólido: a experiência de Brasília. In: **Impacto ambiental do uso do lodo de esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. e SHARMA, R.D. **Alternativa agronômica para o biossólido produzido no Distrito Federal. I – Efeito na produção de milho e adição de metais pesados em Latossolo no cerrado**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 487-495, 2002.

SIMONETE, M.A.; KIEHL, J.C.; ANDRADE, C.A.; ALMEIDA TEIXEIRA, C.F. **Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho.**, Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 38, n. 10, p. 1187-1195, 2003.

SINCLAIR, A.G. **Effect of reactive phosphate rock on the pH of soil under pasture.**; New Zealand Journal of Agricultural Research, v. 36 (3), p. 381-384, 1993.

SLOAN, J.J.; BASTA, N.T. **Remediation of acid soils by using alkaline biosolids**. Journal of Environmental Quality, v. 24, no. 6, p. 1097-1103. 1995.

SMILL, V. **Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences**. Annual Review of Energy and the Environment, v. 25, p. 53-88, 2000.

SOCAL, **Fôlder demonstrativo de produtos.**, Registro-SP, 2006.

SOUMARE, M.; TACK, F. M. G.; VERLOO, M. G. **Ryegrass response to mineral fertilization and organic amendment with municipal solid waste compost in two tropical agricultural soils of Mali**. Journal of Plant Nutrition, v. 26 (6), p. 1169-1188, 2003.

SOUZA, D.M.G. **Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas**. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

SOUZA, M.G.; LOBATO, E. ADUBAÇÃO FOSFATADA EM SOLOS DA REGIÃO DE CERRADO. IN: **ANAIS DO SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, Piracicaba: Potafos/Anda, 2004.

STAUFFER, M.D.; SULEWSKI, G. Fósforo: essencial para a vida. In: **SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA**, Piracicaba. Anais. Piracicaba: Potafos/Anda, 2004.

STEEM, I., **Phosphorus availability in the 21<sup>st</sup> century: management of a new renewable resource**. Phosphorus and Potassium, v. 217, p.25, 1998.

STEHOUWER, R.C., E MACNEAL, K.E.. **Effect of Alkaline-Stabilized Biosolids on Alfalfa Molybdenum and Copper Content.**, Journal of Environmental Quality, v. 33, p. 133-140 , 2004.

STEVENSON, F.J. **Cycles of carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients**. New York, John Wiley e Sons, 1986. 380p.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, rections**. New York: John Wiley and Sons, 1982.

THOMAS, G.W.; PEASLLE, D.E. Testing soil for phosphorus. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D., ed. In: **Soil Testing and Plant Analysis**. Madison: SSSA, 1973, p. 15-32.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D., HAVLIN, J.L. **Soil Fertility and Fertilizers**, 5<sup>th</sup> ed. Macmillan Publisher Company, NY, 1993.

TSUTIYA, M.T. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; PEREIRA SOBRINHO, A.; HESPANOL, I.; CARVALHO, P.C.T.; MELFI, A.J. (Ed.). In: **Biossólidos na agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001.

UDO, E.J.; UZU, F.O. **Characteristics of phosphorus adsorption by some Nigerian soils**. Soil Science American Proceedings, Madison, v.36, p.879-883, 1972.

USEPA. United States Environmental protection agency. 40 CFR - Parts 503. **final rules: standards for the use of sewage sludge**. *Federal Register*, Washington, v.58, p. 9248-9415, 1993.

USEPA. United States Environmental protection agency. **Criteria for classification of solid waste disposal facilities and practices. Code of Federal Regulation 40. Part 257**. Washington, DC, EUA. Federal Register. 44(1979). September. 1979.

USEPA. United States Environmental protection agency. **Code of Federal Regulation 40. Part 503. Standards for the use or disposal of sewage sludge**. Washington, DC, EUA. p. 655-686. 1993.

USEPA. United States Environmental protection agency. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge**. USEPA, 625/R-92/013, Washington, D. C., 1992.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge under 40 CFR part 503. Office of water, Office of science and technology sludge**. Risk Assessment Branch. Washington, DC: editora: Federal Register, 20460, 1992. 147p.

VALLADARES, G.S., PEREIRA, M.G., DOS ANJOS, L.H.C. **Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa..** Bragantia, Campinas, v.62, n.1, p.111-118, 2003.

VENÂNCIO GOMES;S.B.; NASCIMENTO, C. W.A; BIONDI, C.M.; ACCIOLY, A.M.A. **Alterações químicas em argissolo tratado com lodo de esgoto**, Caatinga, v.18, n.3, p.185-194, 2005.

VIEIRA, R.F.; ROBERTO TETSUO TANAKA, R.T.; TSAI, S.M.; PÉREZ, D.V.; SOUSA SILVA, C. M. M. **Disponibilidade de nutrientes no solo, qualidade de grãos e produtividade da soja em solo adubado com lodo de esgoto**; Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.40 n.9 Brasília set. 2005.

WAIGWA, M.W.; OTHIENO, C.O.; OKALEBO, J.R. **Phosphorus availability as affected by the application of phosphate rock combined with organic materials to acid soils in western Kenya.**, Experimental Agriculture, v. 39, p. 395–407, 2003.

WILCOX, G.E.; FAGERIA, N.K. **Deficiências nutricionais do feijão, sua identificação e correção**. Goiânia: Embrapa/CNPAP, 1976. 22p. (Embrapa/CNPAP. Boletim, 5).

XIONG, L.M. ZHOU, Z.G.; LU, R.K. **Enhanced plant growth by uniform placement of superphosphate with rock phosphate in acidic soils**. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 27, p. 15–17, p. 2837-2850, 1996. Y-224, Muscle Shoals, USA, 1992.

ZAPATA, F.; ZAHARAH, A.R. **Phosphorus availability from phosphate rock and sewage sludge as influenced by the addition of water soluble phosphate fertilizer.**, Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 63, p. 43–48, 2002.

ZEE, S.E.A.T.M. van der; FOKKING, L.G.T.; RIEMSDIJK, W.H. van. **A new technique for assessing of reversibly adsorbed phosphate**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.51, p.599-604, 1987.