

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL- UFRGS
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**POTENCIAL DE RECICLAGEM AGRÍCOLA DE RESÍDUOS DE
AGROINDÚSTRIA FUMAGEIRA**

MARCIO HENRIQUE LAUSCHNER
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de
Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) – Brasil
Maio de 2005

Este trabalho é dedicado a meus queridos pais, João Pedro e Annita, exemplos de honestidade, trabalho, fé e amor à família.

AGRADECIMENTOS

É desejo do autor agradecer a todos que diretamente ou indiretamente, ajudaram na longa, intensa, exaustiva e por fim muito proveitosa caminhada do Curso de Mestrado.

A importância de uma palavra amiga nas horas difíceis, de uma idéia valiosa, de um auxílio nas atividades e tarefas cotidianas (relatórios, provas, coletas de solo, medições, análises, determinações, calibrações, aplicações de insumos, irrigações e tantos outros) não pode ser medida e nem estimada; somente sinceramente reconhecida e agradecida ;

No entanto, não poderia deixar de agradecer à algumas pessoas que foram fundamentais na realização deste trabalho:

ao Professor Marino Jose Tedesco, que acreditou na proposta de trabalhar com os RAF's e que jamais permitiu que algum material, estrutura ou orientação faltassem para o bom andamento do trabalho; pela paciência, confiança e amizade;

a todos os professores do PPG Ciência do Solo: Enilson, Renato, Trein, Élvio, Cassol, João, Cimélio, Inda, Egon, Neroli, Scholles, Bohnen e Ibanor e, em especial, aos “residentes no Maracanã”: Carlos Bissani, Clesio Gianello, Pedro Selbach, Flávio Camargo e Fátima Bento que conviveram quase que diariamente e cujas consultas e orientações foram sempre muito valiosas;

à minha “família” em Porto Alegre, com quem convivi e compartilhei diariamente por dois anos: Marcus Almança, Fabiano De Bona e Clara Kurtz;

a meus queridos irmãos: Luis Carlos, Sandra, Sérgio e Graziela pela amizade e apoio incondicional durante toda a jornada;

aos colegas do Pós-Graduação: Cláudio Kray, Leandro Bortolon, Marcio Wally, Fabiano De Bona, Rodrigo Jacques, Elisandra Oliveira, Antonio Xavier, Jonatas Alves, Maurizio, Clarissa Bergamaschi, Luis Fernando, Mariel, Eder, Claudia, Carla, Margarete, Júlio Salton, Leandro Volk, Juliana, Carlos Gustavo, Cacequi, Alaerto, Gustavo, Nilvânia, Josi, Frederico, PC, Adriane, Falberni, Cândida, Edir e Madalena pela amizade e companheirismo;

aos amigos e dedicados funcionários do Laboratório de Solos (LAS-UFRGS): Daniel, Thaís, Bernardete, Tiago, Lisandra, Raquel, Vitor, Diogo, Michele, Elis, Mariete, Alessandra, Gustavo, Plínio e Psit, o reconhecimento pela colaboração e prestatividade nas atividades do laboratório;

aos funcionários da UFRGS: José “Seu Zé” (casa de vegetação e cercado experimental) e Jader (Secretaria do PPG) o reconhecimento pela amizade e colaboração que dispensaram durante as atividades no PPG;

à CAPES/CNPQ, pela concessão da bolsa de pesquisa e ao Laboratório de Análises de Solos da UFRGS pelo apoio financeiro e materiais necessários à execução do trabalho;

aos funcionários das empresas Kannenberg & Cia Ltda (Roesch, Mauro e Rogério) e KBH & C (Leandro), que cederam os resíduos e informações técnicas importantes para o desenvolvimento do trabalho;

ao povo brasileiro, que paga os impostos e propicia a manutenção do Ensino Superior de Graduação, Pós-Graduação e da Pesquisa Pública, tão importantes ao desenvolvimento do país.

Obrigado a todos.

POTENCIAL DE RECICLAGEM AGRÍCOLA DE RESÍDUOS DE AGROINDUSTRIA FUMAGEIRA ¹

Autor: Eng. Agr. Marcio Henrique Lauschner

Orientador: Eng. Agr. PhD Marino José Tedesco

RESUMO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores mundiais de tabaco em folha; entretanto, o beneficiamento industrial gera aproximadamente 35.000 t anuais de resíduos sem valor comercial. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de reciclagem agrícola de dois resíduos de agroindústria fumageira (RAF's), sua mineralização no solo e liberação de nutrientes às plantas. O experimento de aplicação dos resíduos foi conduzido a céu aberto, utilizando vasos com capacidade de 32 litros de solo (PVAd), com um tubo coletor de lixiviado e cultivados com três plantas de milho. Foram utilizados 18 tratamentos com adubo mineral, cama-de-aviário, composto orgânico e com adições de doses crescentes (0, 7,5, 15, 30 e 60 t ha⁻¹) dos resíduos RAF P (pó) e RAF T (talos) além de tratamentos com resíduos (15 t ha⁻¹) e complementação com nutrientes minerais dois a dois (NP, NK e PK), em quatro repetições. O experimento foi iniciado em 15/01/2004, tendo sido a parte aérea das plantas colhida em 16/03/2004. O efeito residual da aplicação dos resíduos foi estudado em duas das repetições, enquanto que em outras duas foram reaplicadas doses equivalentes a 33,3% da dose inicial dos resíduos, utilizando-se o sorgo como planta teste. O sorgo foi semeado em 26/03/2004 e a parte aérea colhida em 14/05/2004. Foram determinados as curvas de resposta de rendimento de matéria seca e o teor de macronutrientes no tecido, no solo e na água de lixiviação, além de outros atributos de fertilidade do solo. Os resultados indicaram que os RAF's são boas fontes de biomassa vegetal e de potássio e possuem potencial para serem reciclados no solo, permitindo a liberação de parte dos macronutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas. As curvas de resposta mostraram que a adição de doses entre 15 e 20 t ha⁻¹ dos resíduos são as mais recomendadas agronomicamente, proporcionando rendimentos de matéria seca equivalentes à fertilização mineral. A mineralização dos resíduos, avaliada pela evolução de C-CO₂, foi de aproximadamente 40% para o RAF P e de 49% para o RAF T. Os resíduos RAF P e RAF T apresentaram valores de neutralização (médias de três solos) de 7,9% e 9,5%, respectivamente. A adição dos resíduos ao solo deve ser calculada para manter o pH do solo próximo a 6,0.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. Brasil. (127 p.) – Maio de 2005. Trabalho realizado com apoio financeiro do MEC/CAPES/CNPQ e do LAS-UFRGS.

AGRICULTURE RECYCLING POTENTIAL OF TOBACCO PROCESSING RESIDUES ²

Author: Eng. Agr. Marcio Henrique Lauschner

Adviser: Eng. Agr. PhD Marino José Tedesco

SUMMARY

Brazil is one of the leaders in the production and trading of tobacco leaves in the global market; otherwise, the industrial processing of the leaves generates near 35.000 tones annually of residues without commercial value. The potential of land disposal and agricultural use of tobacco processing residues (TPR's), their mineralization and the nutrient supply to the plants were studied in this work. The study was conducted in an open area using pots with 32 liters of a Psamment soil, provided with water drainage coletors and tilled with three corn plants each. Eighteen treatments were used with mineral fertilization, poultry manure, compost and increasing adittions (0, 7.5 , 15, 30 and 60 t ha⁻¹) of TPR D (dust) and TPR S (scraps); treatments with the TPR's (15 t ha⁻¹) plus mineral ammendments two by two (NP, NK, KP) were also tested, with four replications each. The experiment was started in 15/01/2004 and dry matter harvested in 16/03/2004. The residue's residual effects were studied on two replicates, and 33% of the initial amount was applied on the other two with sorghum used as testing plants. Sorghum was seeded in 26/03/2004 and dry matter was harvested in 14/05/2004. Response curves of dry matter yield and macronutrients contents in the plants, water leached and other soil fertility atributes were determined. The residue's biodegradation potential and their effects on soil acidity were also studied. The results indicated that TPR's can be important sources of vegetal biomass and potash and have potential to be recycled in the soil, supplying part of the macronutrients required for a proper plant growth. The response curves showed that the residues's application rates between 15 and 20 tones ha⁻¹ are the most adequate for the soil studied, increasing the plant growth and the dry matter content equivalent to the mineral fertilization. The residues's mineralization, evaluated by the C-CO₂ evolution, was 40% for the TPR D and 49% for the TPR S. Since the residue's neutralization potential was determined as 7,9% for the TPR D and 9,5% for the TPR S, the amounts that can be aplyied have to be established in order to mantain soil's pH around 6,0.

² Master of Science Dissertation in Soil Science. Research Programme in Soil Science, Agronomy College, Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, RS, Brazil. (127 p.)- May, 2005. Research supported by MEC/CAPE/CNPQ and LAS-UFRGS.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Fumicultura no Brasil.....	4
2.2 Processo de geração e caracterização dos resíduos.....	5
2.3 Nicotina.....	7
2.4 Descarte de resíduos no solo.....	7
2.5 Critérios para descarte de resíduos.....	9
2.5.1 Nitrogênio.....	10
2.5.2 Valor neutralizante (VN) e efeito no pH.....	12
2.6 Respiração basal e atividade microbiana.....	13
2.7 Matéria orgânica.....	14
2.8 Macronutrientes.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1 Apresentação.....	18
3.2 Caracterização dos solos.....	18
3.3 Caracterização dos resíduos orgânicos.....	20
3.4 Experimento I – Mineralização dos resíduos no solo.....	22
3.4.1 Instalação do experimento.....	22
3.4.2 Determinação da atividade microbiana e da mineralização do carbono.....	23
3.5 Experimento II – Efeitos no sistema solo-planta-água da aplicação e reaplicação e do efeito residual dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF's).....	25
3.5.1 Instalação do experimento.....	25
3.5.2 Primeiro cultivo: milho (<i>Zea mays</i> L.) – Efeito imediato da aplicação dos resíduos no sistema solo-planta-água..	27
3.5.3 Segundo cultivo: sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.) – Efeito residual e da reaplicação dos resíduos no sistema solo-planta-água.....	28

3.6 Experimento III – Avaliação da adição dos resíduos no pH e na acidez potencial do solo.....	30
3.7 Análise estatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Experimento I- Mineralização dos resíduos no solo.....	32
4.1.1 Atividade microbiana.....	32
4.1.2 Fração mineralizada de carbono.....	34
4.1.3 Teores de carbono orgânico do solo.....	36
4.1.4 Nitrogênio mineral.....	37
4.1.5 Valores de pH do solo.....	38
4.2 Experimento II – Efeito no sistema solo-planta-água da aplicação e reaplicação e do efeito residual dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF's).....	39
4.2.1 Efeitos da aplicação dos resíduos.....	39
4.2.1.1 Efeitos no crescimento das plantas.....	39
4.2.1.1.1 Efeitos no índice de eficiência agronômica (IEA).....	42
4.2.1.1.2 Curvas de resposta das plantas à adição dos resíduos.....	43
4.2.1.2 Efeitos da aplicação dos resíduos no solo....	45
4.2.1.2.1 Teores de matéria orgânica e indicadores da reação do solo.....	46
4.2.1.2.2 Disponibilidade imediata de nutrientes no solo.....	47
4.2.1.2.2.1 Teores de fósforo.....	48
4.2.1.2.2.2 Teores de potássio.....	49
4.2.1.2.2.3 Teores de cálcio e magnésio.....	50
4.2.1.3 Absorção de macronutrientes pelas plantas e caracterização da água de lixiviação.....	53
4.2.1.3.1 Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	53
4.2.1.3.2 Fósforo na parte aérea das plantas e lixiviado.....	55
4.2.1.3.3 Potássio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	56
4.2.1.3.4 Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	58
4.2.1.3.5 Magnésio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	59
4.2.1.3.6 Teor de sódio, pH e condutividade elétrica do lixiviado.....	61
4.2.2 Efeito residual e da reaplicação dos RAF's no sistema solo-planta-água.....	63
4.2.2.1 Efeito residual e da reaplicação dos resíduos no crescimento das plantas.....	63

4.2.2.1.1 Índice de eficiência agronômica (IEA)- Efeito residual e da reaplicação dos resíduos.....	65
4.2.2.1.2 Curvas de resposta das plantas- Efeito residual e da reaplicação dos resíduos.....	67
4.2.2.2 Efeito residual e da reaplicação dos resíduos no solo.	69
4.2.2.2.1 Teores de matéria orgânica e indicadores da reação do solo.....	70
4.2.2.2.2 Disponibilidade de nutrientes no solo.....	73
4.2.2.2.2.1 Teores de fósforo.....	73
4.2.2.2.2.2 Teores de potássio.....	74
4.2.2.2.2.3 Teores de cálcio.....	76
4.2.2.2.2.4 Teores de magnésio.....	77
4.2.2.3 Absorção de macronutrientes pelas plantas e caracterização da água de lixiviação.....	78
4.2.2.3.1 Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	79
4.2.2.3.1.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos.....	79
4.2.2.3.1.2 Efeito da reaplicação dos resíduos.....	80
4.2.2.3.2 Fósforo na parte aérea das plantas.....	82
4.2.2.3.3 Potássio na parte aérea das plantas e no lixiviado.....	84
4.2.2.3.3.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos.....	84
4.2.2.3.3.2 Efeito da reaplicação dos resíduos.....	85
4.2.2.3.4 Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	87
4.2.2.3.4.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos.....	87
4.2.2.3.4.2 Efeito da reaplicação dos resíduos.....	88
4.2.2.3.5 Magnésio na parte aérea das plantas e lixiviado.....	90
4.2.2.3.5.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos.....	90
4.2.2.3.5.2 Efeito da reaplicação dos resíduos.....	90
4.2.2.3.6 Teor de sódio, pH e condutividade elétrica do lixiviado.....	93
4.3 Experimento III – Avaliação da adição dos resíduos no pH e na acidez potencial do solo.....	96
4.3.1 Efeitos da adição dos resíduos na acidez ativa do solo.....	96
4.3.2 Efeitos da adição dos resíduos na acidez potencial do solo.....	103
5. CONCLUSÕES.....	104
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	106
7. APÊNDICES.....	114

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Curvas de produção acumulada de C-CO ₂ durante a condução do Experimento I (média de três repetições).....	33
2. Relação entre a produção de C-CO ₂ acumulada ao final do experimento e a dose de RAF adicionada (média de três repetições).....	34
3. Fração mineralizada do carbono adicionado no solo pelos resíduos RAF P e RAF T (média de três repetições).....	35
4. Teores de carbono orgânico no solo ao final do experimento (média de três repetições).....	37
5. Nitrogênio mineralizado no solo ao final do experimento (média de três repetições).....	37
6. Valores de pH em água (1:1) determinados no final do experimento de incubação (média de três repetições).....	39
7. Rendimento de matéria seca (MS) na parte aérea do milho nos tratamentos com a adição de doses crescentes dos resíduos (médias de quatro repetições).....	40
8. Rendimento de MS de milho nos tratamentos com a dose de 15 t ha ⁻¹ dos RAF's e nutrientes minerais (médias de quatro repetições).....	42
9. Curvas de resposta em rendimento de matéria seca (MS) do milho para as adições de até 30 t ha ⁻¹ dos resíduos RAF P e RAF T.....	45
10. Fósforo disponível (extraído pela solução Melich-1) no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições).....	48
11. Potássio trocável determinado no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições).....	49

12.	Teores de Ca e Mg trocável determinado no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições).....	51
13.	Aumento da CTC $pH_{7,0}$ em função da adição de doses crescentes de RAF's no solo PVAd (média de quatro repetições).....	51
14.	Curvas de aumento dos teores de P disponível e de K, Ca e Mg trocáveis no solo com adição de doses crescentes de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's).....	52
15.	Curva de resposta residual para o RAF P (pó) e para o RAF T (talos) no cultivo de sorgo.....	68
16.	Curva de resposta da reaplicação (33,3% da dose inicial) do RAF P (pó) e do RAF T (talos) no cultivo de sorgo.....	69
17.	Fósforo disponível no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições).....	73
18.	Potássio trocável determinado no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições).....	75
19.	Teores de Ca trocável determinados no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições).....	76
20.	Teores de Mg trocável determinados no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições).....	78
21.	Valores de pH determinados (média de 3 repetições) durante o experimento nos solos a) PVAd, b) PVd e c) NVdf, nos tratamentos com a adição de RAF P.....	98
22.	Valores de pH determinados (média de 3 repetições) durante o experimento nos solos a) PVAd, b) PVd e c) NVdf, nos tratamentos com a adição de RAF T.....	99
23.	Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo PVAd (Itapoã) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias).....	101
24.	Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo PVd (São Jerônimo) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias).....	102
25.	Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo NVdf (Estação) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias).....	104

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Caracterização físico-química dos solos PVAd, PVd e NVdf nos Experimentos I, II e III.....	19
2. Caracterização físico-química dos resíduos orgânicos utilizados nos Experimentos I, II e III.....	21
3. Tratamentos utilizados no Experimento I.....	23
4. Tratamentos utilizados no Experimento II.....	27
5. Índice de eficiência agrônômica (IEA) dos tratamentos (média de quatro repetições).....	43
6. Caracterização química do solo após o cultivo do milho (médias de quatro repetições).....	47
7. Nitrogênio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado durante o cultivo do milho (média de quatro repetições).....	54
8. Fósforo e potássio total na parte aérea das plantas (MS) e potássio lixiviado (média de quatro repetições).....	57
9. Cálcio na parte aérea (MS) das plantas de milho e lixiviado do solo (média de quatro repetições).....	58
10. Magnésio na parte aérea (MS) das plantas de milho e lixiviado do solo (média de quatro repetições).....	60
11. Sódio lixiviado e pH e condutividade elétrica (CE) determinados na água de lixiviação coletada durante o cultivo do milho (média de quatro repetições).....	62
12. Rendimento de MS do sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos de agroindústria fumageira...	65
13. Índice de eficiência agrônômica (IEA) dos tratamentos em relação ao tratamento com nutrientes minerais (NPK) (média de duas repetições).....	66
14. Teores de MO e de CTC e indicadores da reação do solo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos após o segundo cultivo (sorgo).....	72

15.	Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado do solo no estudo do efeito residual dos RAF's durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições).....	80
16.	Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado do solo no estudo do efeito da reaplicação dos RAF's durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições).....	81
17.	Fósforo na parte aérea das plantas de sorgo no estudo do efeito residual e da reaplicação dos RAF's (média de duas repetições).....	83
18.	Potássio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado durante o cultivo do sorgo no estudo do efeito residual dos RAF's (média de duas repetições).....	84
19.	Potássio na parte aérea das plantas e lixiviado no estudo do efeito da reaplicação dos resíduos no cultivo do sorgo (média de duas repetições).....	86
20.	Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado no estudo do efeito residual durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições).....	87
21.	Cálcio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado no estudo do efeito da reaplicação dos resíduos durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições).....	89
22.	Magnésio na parte aérea das plantas de sorgo e lixiviado no estudo do efeito residual da aplicação dos resíduos (média de duas repetições).....	91
23.	Magnésio na parte aérea das plantas de sorgo e lixiviado no estudo da reaplicação dos resíduos (média de duas repetições).....	92
24.	Sódio lixiviado, valores de pH e condutividade elétrica (CE) da água de lixiviação coletada durante o cultivo do sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (média de duas repetições).....	95
25.	Valores de pH em água (médias de quatro determinações e de três repetições durante o período de 35 a 77 dias).....	97
26.	Equivalência dos resíduos RAF P e RAF T ($t\ ha^{-1}$) em relação à $1,0\ t\ ha^{-1}$ de carbonato ($CaCO_3 + MgCO_3$).....	100
27.	Acidez potencial determinada pelo índice SMP (médias de quatro determinações e de três repetições durante o período de 35 a 77 dias).....	103

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Determinações da produção de C-CO ₂ em mg kg solo ⁻¹ (média de três repetições) durante a condução do experimento de mineralização dos resíduos.....	114
2. Rendimento de matéria seca (MS) e teor de macronutrientes no tecido de milho (média de quatro repetições).....	118
3. Disponibilidade de macronutrientes e CTC do solo após o cultivo do milho (média de quatro repetições).....	119
4. Volume total, pH, sódio, condutividade elétrica (CE) e teor de macronutrientes no lixiviado durante o cultivo do milho (média de quatro repetições).....	120
5. Teores de macronutrientes na parte aérea das plantas de sorgo nos tratamentos sob o efeito residual da aplicação e com a reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições).....	121
6. Teores de macronutrientes nas amostras de solo dos tratamentos de reaplicação e residual dos RAF's, coletadas após o segundo cultivo (sorgo).....	122
7. Valores de pH em água (1:1) no solo PVAd durante a condução do Experimento III (médias de três repetições).....	123
8. Valores de pH em água (1:1) no solo PVd durante a condução do Experimento III (média de três repetições).....	124
9. Valores de pH em água (1:1) no solo NVdf durante a condução do Experimento III (média de três repetições).....	125
10. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo PVAd (médias de três repetições).....	126
11. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo PVd (médias de três repetições).....	127
12. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo NVdf (médias de três repetições).....	128

1. INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e industrialização ocorrida nas últimas décadas no Brasil e no mundo proporcionaram a melhoria da qualidade de vida de grande parte da população, facilitando o acesso aos bens de consumo modernos.

No entanto, a concentração de pessoas e indústrias nos grandes centros urbanos favorece a produção de quantidades crescentes de lixo e efluentes domésticos e industriais. Com as previsões de aumento ainda maior da população, é fundamental que sejam desenvolvidas tecnologias ambientalmente compatíveis para tratamento e descarte de resíduos e efluentes, sobretudo aqueles de difícil decomposição ou manejo.

Como o descarte em lixões ou aterros sanitários possui restrições em termos de disponibilidade de áreas e de custos ambientais e econômicos, as alternativas de aplicação controlada em solos agrícolas assumem papel fundamental no sentido de minimizar os impactos ambientais destas atividades, além de possibilitarem o reaproveitamento de parte ou de toda a energia e os nutrientes presentes nos materiais orgânicos. Isto pode contribuir para resolver problemas de empresas públicas e privadas que buscam a excelência da produção com qualidade na gestão ambiental. Por outro lado, há o setor de produção agrícola, com grandes extensões de área cultivada em solos que, em geral, necessitam do aporte de corretivos da acidez e de nutrientes.

Conforme Murdock (1993), ao longo do tempo, a maioria dos solos utilizados na agricultura tornam-se deficientes em um ou mais nutrientes essenciais. Isso pode ocorrer devido aos baixos níveis de fertilidade natural

e/ou às perdas de nutrientes por erosão, lixiviação, volatilização e pela exportação de nutrientes nas colheitas. Um exemplo disto ocorre com os solos da Região Fumageira de Santa Cruz do Sul-RS que, apesar do grande aporte anual de nutrientes nas lavouras de fumo (aproximadamente $800 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de fertilizantes), apresentam atributos de fertilidade como matéria orgânica, micronutrientes e acidez do solo inferiores aos das médias do Estado (Kirst, 2001).

O interesse em reduzir as perdas de solo e de nutrientes no sistema agrícola e a crescente preocupação com a contaminação de mananciais de água tem aumentado a demanda de pesquisas com sistemas conservacionistas de manejo do solo, com as corretas recomendação e aplicação de fertilizantes e com a reciclagem de nutrientes para manutenção e melhoria da fertilidade natural dos solos agrícolas.

Em geral, a maior parte dos resíduos e efluentes, tanto agrícolas como urbanos ou industriais, possuem potencial para reciclagem em solos agrícolas. Entretanto, é necessário conhecer a sua composição química, a resposta das plantas em relação ao seu valor fertilizante, as taxas de mineralização de nutrientes e que seja identificada a presença de possíveis contaminantes (por ex. metais pesados, patógenos e xenobióticos) e suas interações com o solo, água e as próprias plantas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de reciclagem agrícola de dois tipos de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's) em relação ao seu valor fertilizante, à taxa de mineralização de nutrientes, à lixiviação de nutrientes e aos seus efeitos nos atributos de fertilidade e reação do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A informação científica referente ao descarte e ao manejo de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's) é pequena, apesar do cultivo e o processamento do tabaco (*Nicotiniana tabacum*) estar distribuído em praticamente todos os continentes.

Na organização funcional do sistema de produção agrícola, deve prevalecer a preocupação de que não haja lixo ou resíduos (Khatounian, 2002). Para isso, os subprodutos de uma exploração devem ser aproveitados como insumos em outra, objetivando a minimização de custos ambientais e energéticos para sua execução. Neste sentido, os resíduos de agroindústria fumageira (RAF's) deveriam ingressar novamente no sistema agrícola, pois, em última análise, foram retirados na colheita das folhas de fumo (exportação de nutrientes e biomassa).

Usualmente, os resíduos orgânicos das folhas de tabaco são descartados em solos agrícolas como fertilizantes e/ou condicionadores de solo. Entretanto, devido à modernização na legislação ambiental e às próprias demandas do controle de qualidade da produção industrial (por ex. normas ISO's), são necessários indicadores de base técnica, que possibilitem o correto manejo e o reaproveitamento racional dos resíduos e/ou subprodutos do processamento das folhas de tabaco em solos agrícolas.

Por outro lado, é extensa a literatura científica referente ao tratamento, ao manejo e ao descarte de materiais orgânicos como efluentes urbanos e industriais (lodos de estações de tratamento de esgoto/biossólidos, composto de lixo e outros) e em relação ao aproveitamento de resíduos e dejetos de animais (estercos de aves, suínos, bovinos e outros) na agricultura.

A seguir serão feitas comparações destas atividades em relação ao tema de estudo deste trabalho, objetivando orientar a revisão dos trabalhos com uma base científica comum e ressaltando-se especificidades relacionadas aos resíduos orgânicos das agroindústrias fumageiras (RAF's).

2.1 Fumicultura no Brasil

Conforme a Associação dos Fumicultores do Brasil (Afubra, 2004), a história do fumo no País data do período colonial, quando a produção se concentrava no nordeste brasileiro, entre Recife e Salvador. O produto era muito apreciado por marinheiros e soldados, enquanto crescia o consumo pela nobreza européia. As folhas de primeira e segunda qualidades eram enviadas para Lisboa e serviam como moeda de troca por artigos diversos e impostos da Coroa Real.

O tabaco foi um dos primeiros produtos de exportação do Brasil, fomentado pelos comerciantes portugueses, ávidos em abastecer as cortes européias, sobretudo as de Portugal e França. Por outro lado, a terceira classe do tabaco brasileiro abastecia o mercado interno e as trocas por escravos negros com as colônias portuguesas da África .

O crescimento do mercado consumidor possibilitou a expansão do cultivo do tabaco para outros estados como Minas Gerais, São Paulo e, de forma mais acentuada, no Rio Grande do Sul, com a chegada dos imigrantes europeus, especialmente os germânicos. Em 1824 iniciou-se o cultivo na Colônia de São Leopoldo e em 1850 na Colônia de Santa Cruz, constituindo-se numa das primeiras moedas de troca dos lavradores germânicos por tecidos, alimentos, ferramentas e por outros mantimentos, com as companhias de imigração portuguesas.

As cifras de exportação de fumo já eram expressivas no século XIX e contabilizavam aproximadamente 42 mil toneladas no decênio de 1821/30, 46 mil toneladas de 1841/1850 e, na década seguinte, 80 mil toneladas. As exportações contabilizaram 210 mil toneladas na última década do século XIX.

A partir de 1940, a conjuntura internacional beneficiou os produtores brasileiros pelo aumento do consumo de fumos claros, introduzidos no Rio

Grande do Sul no início do século. Ao longo de 40 anos, triplicou-se a área cultivada e a produção foi multiplicada por quatro, estendendo-se do Rio Grande do Sul para regiões coloniais de Santa Catarina e do Paraná.

Os fundamentos básicos do sistema integrado de produção: assistência técnica, financiamento da infra-estrutura e garantia de compra da produção, aliados à produção de tabaco de alta qualidade nas pequenas propriedades e uma estrutura de negócios competitiva, fizeram do Brasil uma referência mundial no mercado de tabaco.

O Brasil é um dos maiores produtores e, atualmente, o líder mundial na exportação de fumos claros em folha, gerando um faturamento de aproximadamente US\$ 1,2 bilhões anualmente para o país (MAPA, 2004). Na Região Sul do país participam aproximadamente 190.000 famílias integradas no cultivo de tabaco, a maioria em propriedades de agricultura familiar e com área média de lavoura de, aproximadamente, dois hectares.

A produção brasileira é de aproximadamente 850.000 toneladas anuais de fumos claros em folha. Deste montante, 85% é exportado para países da Europa, América do Norte, Ásia e Oriente Médio (Afubra, 2005). Os resíduos do processamento das folhas nas indústrias contabilizam aproximadamente 4% ou 35.000 toneladas anuais (KBH & C, 2004).

2.2 Processo de geração e caracterização dos resíduos

A produção dos resíduos ocorre durante o processo de beneficiamento das folhas nas agroindústrias. Após a recepção e a classificação dos fardos, as manocas (grupo de 25 folhas) são abertas nas mesas de alimentação e as folhas conduzidas para o desponte, onde é retirada a parte da folha que não precisa ser destalada. Em seguida, são conduzidas a um grupo de esteiras para classificação de qualidade das folhas, conforme o critério de classe de cor e posição na planta e para retirada manual (catação) de corpos estranhos como pedras, cordas, penas e outros materiais. A partir desse ponto as folhas passam por um cilindro reumidificador (com vapor de água) para adquirirem maior elasticidade e resistência. A etapa seguinte é a passagem pelas máquinas de debulha, onde as lâminas das folhas são

separadas dos respectivos talos, através de sucessivas passagens pelos estágios do processo de debulha, onde são obtidos dois produtos diferentes: lâminas e talos. É nesta fase do processo que ocorre a maior geração de resíduos.

Os talos, apesar de serem considerados produtos menos nobres que as lâminas, são utilizados como enchimento em várias misturas de fumo; este processo é feito nas indústrias de cigarros e compõe o *blending* ou sabor de cada marca de cigarros. Entretanto, a qualidade industrial das folhas de fumo depende diretamente do tamanho do corte das lâminas e dos talos. Talos ou frações de lâmina (*scraps*) muito pequenas que não podem ser utilizados nos cigarros, pois interferem na qualidade de combustão. Essas frações são descartadas e constituem parte dos resíduos das agroindústrias fumageiras (RAF's).

Os resíduos são constituídos principalmente pelo pó que é extraído durante todo o processo produtivo por sistemas de exaustão e tamização e pelos fragmentos de talos sem valor comercial, constituindo-se em aproximadamente 95% e 5% do total dos resíduos, respectivamente. Compõem ainda os resíduos de agroindústria fumageira (RAF's), a varredura do chão das fábricas, constituída principalmente por materiais como argila, areia e o próprio pó-de-fumo. Neste trabalho, os resíduos em pó e os resíduos em talos de agroindústria fumageira serão denominados, de agora em diante, de *RAF P* e de *RAF T*, respectivamente.

Ao final do processo, as folhas e os talos são submetidos a reumidificação e a posterior aquecimento sob altas temperaturas, processo denominado industrialmente como esterilização. Os resíduos *RAF P* e *RAF T* apresentam nas câmaras de exaustão (local de recepção e armazenamento dos resíduos), um percentual de umidade muito baixo, de aproximadamente 4%. Os resíduos apresentam relação C:N baixa e contém teores relativamente altos de macronutrientes, principalmente de potássio (ver Tabela 2). Outra característica importante dos RAF's é o caráter hidrofóbico dos materiais, que demoram a absorver água e dificultam a mistura entre as fases líquida e sólida.

2.3 Nicotina

A nicotina ($C_{10}H_{14}N_2$) é o principal alcalóide do tabaco e o princípio ativo que causa dependência nos fumantes. É considerada como um estimulante leve, responsável pelo aumento da concentração de dopamina no cérebro, neurotransmissor responsável pela sensação de prazer em humanos (QMC-UFSC, 2005). Os resíduos de fumo tipo Virgínia (*Virginia Flue Cured - VFC*) podem apresentar teores de nicotina de 1,0 até 2,7% do peso em massa; outras variedades podem apresentar resíduos com até 6,5% de nicotina (TIFAC, 2005). Na forma de sulfato de nicotina 40% (extraída por solventes orgânicos) é considerada um potente inseticida botânico de contato. Entretanto, possui rápida biodegradação e não apresenta efeito residual (TIFAC, 2005).

Por outro lado, alguns trabalhos científicos relacionam a nicotina como droga que pode ser utilizada em terapias para diminuir os efeitos de doenças degenerativas do sistema nervoso central, como Mal de Parkinson e Alzheimer (TIFAC, 2005).

A característica física pulverizada (pó) do RAF P dificulta seu manuseio e facilita a exposição epidérmica ao resíduo, exigindo cuidados especiais no manejo como: uso de macacão, óculos e máscara de proteção (EPI). Pessoas sensíveis, dependendo da extensão do contato com a pele, especialmente em dias quentes, podem apresentar sintomas de intoxicação por nicotina, como náuseas e tonturas.

2.4 Descarte de resíduos no solo

Desde que o homem desenvolveu hábitos de cultivar e de domesticar plantas com a finalidade de produção de alimentos, as cinzas minerais e os resíduos orgânicos foram utilizados como fonte de nutrientes para as plantas. Desde o antigo Egito, passando pelo Império Romano, há relatos escritos a respeito de práticas agrícolas como a “estercação”, a calagem, a adubação verde e a adição de cinzas e de farinha de ossos para aumentar a fertilidade do solo; também os índios americanos utilizavam camas

de animais e, inclusive de peixes (fontes de P e N) na cova de semeadura do milho (Kiehl, 1985).

No final do século XIX, as descobertas de Liebig, de Saussure, de Boussingault e de outros cientistas referentes à nutrição mineral das plantas derrubaram as teorias humistas e proporcionaram as bases da agricultura moderna (Malavolta, 1981). Entretanto, a crise do petróleo na década de 70 e o aumento do custo dos fertilizantes, aliado à expansão das criações confinadas (principalmente suínos, aves e gado-de-leite) levaram à utilização dos resíduos e dejetos orgânicos como fontes de nutrientes para as plantas. Trabalhos pioneiros como os de Holanda et al. (1981), Ernani (1981) e de Ernani & Gianello (1984) demonstraram que era viável a utilização dos resíduos de origem animal na fertilização de solos agrícolas do Rio Grande do Sul.

A partir da década de 90 os dejetos e resíduos de origem animal e de atividades agroindustriais deixaram de ser exclusivamente fonte de nutrientes (fertilizantes orgânicos) e passaram à condição de fontes potenciais de poluição do ambiente, principalmente de mananciais de água superficial e subsuperficial (Tedesco et al., 1999).

O solo, por suas características químicas, físicas e biológicas, passa a ser encarado como a melhor opção para o descarte controlado de resíduos de origem urbana e industrial (Tedesco et al., 1999). Por conseguinte, não se trata apenas de considerar o solo como “lixreira”, mas estabelecer e delimitar tecnicamente as soluções mais corretas ambientalmente para o destino e o descarte de resíduos e de subprodutos das atividades antrópicas, reduzindo ao máximo as externalidades negativas destas práticas. Com base em dados técnicos, é possível racionalizar o sistema produtivo, reciclando e possibilitando o retorno e/ou direcionamento de parte e/ou de toda energia e nutrientes para outras atividades produtivas.

Alguns resíduos orgânicos, como os esterco e as farinhas de origem animal e vegetal podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos no solo sem passar por tratamentos prévios. Entretanto, conforme Mattiazo (1996), citada por Segatto (2001), existem outros resíduos que necessitam obrigatoriamente passar por condicionamento e tratamento especial antes de serem utilizados como fertilizantes pelos agricultores.

São necessários, portanto, critérios técnicos definidos por órgãos de pesquisa oficiais, que possibilitem e delimitem a utilização dos solos agrícolas como potenciais receptores de resíduos e subprodutos de origem industrial, agrícola ou urbana.

A utilização agrícola de materiais orgânicos como insumos na agricultura dependerá de fatores como: sazonalidade das demandas, custos do tratamento, transporte e aplicação a campo. O planejamento das atividades e o monitoramento ambiental também são aspectos importantes na decisão do descarte agrícola de resíduos orgânicos (Ferreira et al, 1999a).

2.5 Critérios para descarte de resíduos

Os critérios técnicos para o descarte de resíduos e subprodutos de atividades industriais e urbanas em solos agrícolas são obtidos em estudos prévios com: a) adição de doses crescentes destes materiais aos solos e b) estimativa do impacto em parâmetros de rendimento e composição vegetal das plantas e do ambiente (água e solo). Dependendo do material, são indicadas medidas mitigatórias para tratamento e aplicação dos resíduos no solo, evitando-se efeitos negativos ao sistema solo-água-plantas-animal e/ou ao homem (Tedesco et al., 1999).

O princípio da não-degradação ambiental deve ser o principal critério na utilização do solo para o descarte de resíduos. É essencial que a adição de resíduos ou de materiais orgânicos não impossibilite irreversivelmente a utilização do solo conforme suas aptidões normais (Page et al, 1985).

Devido à ampla variedade de resíduos, deve-se monitorar o seu comportamento no solo principalmente pela sua composição química e pela taxa de mineralização de seus nutrientes e/ou solubilização de seus elementos potencialmente perigosos (Alexander, 1994; Sparks, 1995; Meurer et al., 2000). Para Page et al. (1985), o planejamento de sistemas de aplicação de resíduos no solo deve considerar:

- a) a identificação de variáveis limitantes de ordem ambiental;

- b) a determinação do(s) principal(is) limitante(s) à aplicação dos resíduos;
- c) a determinação da taxa de adição e da capacidade/carga máxima de cada variável limitante.

Conforme Segatto (2001), os critérios de aplicação dos resíduos no solo (SANEPAR, 1997; CETESB, 1999; Rodrigues et al., 1993) levam em consideração três características principais dos materiais orgânicos:

- a) a taxa de mineralização de nitrogênio (TMN) que pode variar de acordo com teor de N, relação C:N e recalitrância de cada material;
- b) o teor de metais pesados do material, com valores máximos permitidos em aplicação e quantidade acumulada;
- c) Valor neutralizante da acidez (VN) do resíduo.

No caso dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF's), serão abordados os itens a e c, uma vez que os teores de metais pesados são baixos nestes materiais.

O perfil sanitário e a presença de patógenos e/ou parasitas (fatores biológicos), além do teor de umidade (fator relacionado ao transporte, armazenamento e aplicação a campo), também devem ser considerados na decisão de uso dos resíduos orgânicos na agricultura (Ilhenfeld et al., 1999).

2.5.1 Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes exigidos em maior quantidade e, freqüentemente o que mais limita o rendimento vegetal, principalmente em culturas da família das gramíneas. É assimilado pelas plantas preferencialmente na forma mineral como íons NH_4^+ e NO_3^- (Marschner, 1986).

No caso de uso agrícola, a disponibilidade de N nos resíduos comumente determina o valor fertilizante do material (Kiehl, 1985). Entretanto, por estar sujeito a inúmeras reações de ordem microbiológica no solo,

aplicações muito elevadas deste nutriente podem determinar grande impacto sobre a qualidade das águas superficiais e subsuperficiais. O nitrogênio, especialmente na forma nítrica, é muito móvel e desloca-se facilmente da zona radicular para camadas mais profundas do solo, podendo contaminar o lençol freático (Ferreira et al., 1999b).

O solo é um meio poroso capaz de reter partículas, enquanto a solução (água) passa pelo perfil. Dependendo das partículas, os sólidos suspensos podem ficar aderidos na interface água-solo ou retidos na matriz do solo. Estes constituintes estarão imobilizados, a menos que sofram alterações químicas ou biológicas e passem para a solução do solo (Page et al., 1985).

É importante que a água de percolação seja isenta ou apresente baixo nível de contaminação por nitratos. Para atingir este objetivo, são necessários estudos que estabeleçam critérios técnicos que contemplem a máxima absorção de N pelas plantas e minimizem a lixiviação desse nutriente no perfil do solo. Conforme a Portaria nº 36 (19/01/1990) do Ministério da Saúde, águas com teores de N na forma de nitrato maiores que 10 mg L^{-1} são classificadas como impróprias para o consumo humano (Ferreira et al., 1999b; Segatto et al., 2001; Quadro, 2003).

Além da lixiviação/percolação de nitratos, dependendo do método e da dose de resíduos aplicados ao solo, podem ocorrer elevadas perdas de N por volatilização, desnitrificação, escoamento superficial e por fixação de NH_4^+ por argilas (Guenzi et al, 1978; Ernani, 1981).

A aplicação de elevadas doses de esterco de aves ao solo pode aumentar rapidamente o pH pelo processo de amonificação. Este fenômeno pode proporcionar a volatilização de amônia (NH_3) e, por conseguinte, o despreendimento de amônia pode inibir a atividade das bactérias do gênero *Nitrobacter*, causando acúmulo de nitrito no solo e fitotoxidez às plantas (Ernani, 1981, Victoria et al., 1992).

Em condições anaeróbias, algumas bactérias de solo podem utilizar o nitrato como aceptor de elétrons, processo conhecido como desnitrificação ou “respiração do nitrato”, causando a perda de nitrogênio na forma de gás N_2 e NO_x (Marschner, 1986; Victoria et al., 1992). Este processo pode ser favorecido quando se adiciona elevada dose de resíduos ao solo, causando grande demanda de O_2 e surgimento de microsítios de anaerobiose devido à intensa

atividade dos microrganismos e à elevada produção de CO₂ (Guenzi et al., 1978; Ernani, 1981; Segatto, 2001).

2.5.2 Valor neutralizante (VN) e efeito no pH do solo

A acidez é um dos principais indicadores de fertilidade do solo. A concentração de H⁺ na solução do solo (acidez ativa) e de H⁺ + Al³⁺ (acidez potencial), mensurada pelo pH e estimada pelo índice SMP, respectivamente, podem auxiliar no diagnóstico da atividade microbiana (Selbach, 1989), da presença de elementos tóxicos às plantas, da solubilidade e disponibilidade de nutrientes (macro e micro) (Volkweiss, 1989; Tedesco & Bissani, 2004) e de elementos tóxicos como os metais pesados no solo (Sparks, 1995; Sposito, 1989; Tedesco et al., 1993; Meurer et al., 2000a).

Durante determinado tempo, atribuiu-se à acidez do solo a presença de ácidos orgânicos da matéria orgânica do solo; entretanto, a matéria orgânica decomposta em condições aeróbicas tem reação alcalina, elevando o pH, pelo menos temporariamente (Kiehl, 1985; Miyazawa et al., 2000). O efeito no pH pode ser temporário, atribuído, por exemplo, ao processo de amonificação da fração nitrogenada dos resíduos (Kiehl, 1985; Ernani, 1981; Fenton & Helyar, 2002) ou duradouro, quando os resíduos possuem na sua composição óxidos de cálcio e/ou de magnésio que conferem algum valor de neutralização de acidez, como no caso de alguns lodos de estações de tratamento industriais (Kray, 2001; Segatto, 2001; Teixeira, 2003).

A presença de ligantes orgânicos e bases catiônicas (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) nos resíduos pode diminuir a acidez do solo por reações de complexação organometálica e também proporcionar a diminuição da saturação do alumínio (Al%) na CTC efetiva do solo, respectivamente (Miyazawa et al., 1993; Ernani & Gianello, 1983). A fitotoxicidade de manganês em solos ácidos também pode ser reduzida com adição de matéria orgânica ao solo (Döbereiner & Alvahydo, 1966).

A aplicação de altas doses de resíduos orgânicos nem sempre pode provocar alteração significativa nos valores de pH do solo. Este fato pode ser atribuído ao poder tampão do solo (Gianello & Ernani, 1983; Kiehl, 1985), à

natureza química dos resíduos (Segatto, 2001) e/ou à ausência de medições imediatamente após a adição dos resíduos ao solo (Ernani, 1981).

Por outro lado, conforme Kiehl (1985), a matéria orgânica pode tanto aumentar o pH em solos ácidos como diminuí-lo em solos alcalinos. O autor cita o trabalho de Primavesi (1968), no qual a adição de 40 t ha^{-1} de esterco bovino aumentou o pH em solo ácido (4,5 para 5,8) e diminuiu o pH em solo alcalino (8,5 para 7,6). A autora atribuiu os resultados ao fato do plasma microbiano apresentar valor de pH igual a 6,8, sugerindo que os microrganismos, durante a decomposição, tendam a criar no meio uma reação muito próxima a de seu próprio organismo.

Entretanto, sabe-se que os grupos funcionais de superfície da matéria orgânica (R-COO^- e R-O^-) podem estar protonados ou dissociando prótons, conforme o pH e o ponto de carga zero (PCZ) do solo (Sparks, 1995; Sposito, 1989; Meurer et al., 2000b). Esta característica permite que um mesmo solo apresente capacidade de troca de cátions (CTC) e/ou capacidade de troca de ânions (CTA), em função de valores de pH acima e abaixo do PCZ, respectivamente.

2.6 Respiração basal e atividade microbiana

O solo pode ser considerado um grande biorreator, proporcionando a degradação e a mineralização de nutrientes de compostos orgânicos a ele adicionados. Também pode proporcionar a inativação, detoxificação ou mesmo a ativação ou magnificação da toxicidade de substâncias químicas orgânicas e/ou inorgânicas pela decomposição em compostos ou moléculas mais simples (Moreira & Siqueira, 2001; Musumeci, 1992).

A adição de energia e de nutrientes com os resíduos orgânicos aplicados ao solo pode aumentar a atividade e o crescimento da população microbiana. Conforme Stotsky (1965), a atividade de microrganismos aeróbios pode ser quantificada pela modificação da respiração basal e pela produção do CO_2 em condições controladas de ambiente. A quantificação da atividade microbiana pela produção de CO_2 também pode ser feita a campo; entretanto,

a variação nos dados pode ser elevada, devido à influência de fatores climáticos (Naganawa et al., 1989).

O monitoramento da atividade microbiana pela produção de CO₂ pode ser utilizado como estimativa da velocidade de decomposição e da mineralização de resíduos orgânicos adicionados ao solo (Selbach, 1989; Musumeci, 1992). A estimativa da velocidade de decomposição é importante, pois os nutrientes presentes nos materiais orgânicos precisam estar na forma mineral para serem absorvidos pelas plantas. Portanto, resíduos orgânicos com teores de nutrientes semelhantes, podem disponibilizar (mineralizar) nutrientes no solo em quantidade e velocidades diferentes, influenciando o crescimento e o rendimento de plantas cultivadas (Ernani, 1984). Conforme a CQFS/NRS (2004), considerando-se o primeiro cultivo, a quantidade de nitrogênio mineralizada pode variar de aproximadamente 80% até 20% em relação ao total presente em esterco líquido de suínos e lodo de esgoto, respectivamente.

2.7 Matéria orgânica

A matéria orgânica tem sido considerada um dos principais indicadores da qualidade e do potencial produtivo de solos agrícolas (Vezzani, 2001; Mielniczuk, 1999), estando relacionada diretamente com suas características químicas, físicas e biológicas. Dentre os atributos que são afetados pela matéria orgânica do solo, destacam-se: a capacidade de troca de cátions (CTC), a disponibilidade de macro e de micronutrientes, a atividade biológica, a agregação e a estruturação do solo, a capacidade de infiltração e de retenção de água, a resistência à erosão e à lixiviação de nutrientes e o potencial de emissão de gases, entre outros (Mielcnizuk, 1999, Kiehl, 1985; Bayer & Mielcnizuk, 1999).

As aplicações dos adubos minerais produzidos industrialmente têm obtido êxito no aumento ou reposição de macro e de micronutrientes no solo, melhorando sua fertilidade do ponto de vista químico. Entretanto, não possuem ou têm pouca influência direta na melhoria das condições físicas e biológicas do solo (Kiehl, 1985). Por outro lado, a adição de matéria orgânica e/ou fertilizantes orgânicos pode melhorar a qualidade do solo nos atributos

químicos, físicos e biológicos, atuando na manutenção e/ou no aumento da fertilidade e da capacidade produtiva (Kiehl, 1985; Bayer & Mielniczuk, 1999).

Em geral, as atividades agrícolas alteram o conteúdo de matéria orgânica do solo, estabelecendo condições ótimas para os processos de oxidação e mineralização microbiana. Quanto maior a intensidade de uso do solo e de sistemas de cultivo com baixo aporte de resíduos, maior é a redução nos teores de matéria orgânica e a degradação do solo (Bayer & Mielniczuk, 1999). Sistemas agrícolas conservacionistas buscam reduzir a mobilização/preparo do solo e aumentar o período e a quantidade de cobertura viva ou morta ao longo do ano. Conforme Allison (1973) citado por Bayer & Mielniczuk (1999), a principal forma de ingresso de matéria orgânica no solo é a adição de resíduos da parte aérea e das raízes das plantas.

Entretanto, a adição de resíduos orgânicos de origem vegetal (tortas e palhas em geral) e animal (estercos, camas e outros) e/ou por fertilizantes orgânicos elaborados (composto orgânico, biossólidos e vermicomposto) ao solo pode aumentar de forma direta o teor de matéria orgânica e/ou indireta pela adição de nutrientes e pelo aumento na produção de matéria seca das plantas cultivadas (Kiehl, 1985; Tedesco et al., 1999, Selbach & Sá, 2004).

A partir de 2150 análises de solo da região fumageira de Santa Cruz do Sul-RS, Kirst (2001) verificou que mais de 70% delas apresentavam teor de MO considerada baixa (< 2,5 %) pela Comissão... (1994). O autor atribuiu este fato ao cultivo intensivo, ao baixo teor de argila e a falta de cobertura do solo durante o ano.

O cultivo do tabaco de forma convencional (com intenso revolvimento do solo) aliado às condições de relevo da região e à grande exportação de matéria seca e de nutrientes com a colheita das folhas também podem ser apontados como fatores que condicionam a diminuição dos teores de matéria orgânica do solo.

2.8 Macronutrientes

Além da matéria orgânica, os resíduos orgânicos podem adicionar ao solo quantidades expressivas de nutrientes necessários ao desenvolvimento

de plantas. Holanda et al. (1982), trabalhando com diferentes adubos orgânicos, determinou que estes materiais supriram quantidades suficientes de nutrientes às plantas e aumentaram os teores de P e de K do solo.

As plantas necessitam absorver do solo os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e os micronutrientes (B, Fe, Na, Mn, Co, Zn, Cl, Mo, Si e Cu), além de carbono, hidrogênio e oxigênio do ar e água para sua correta nutrição e desenvolvimento (Marschner, 1986). Todos estes elementos são encontrados em resíduos orgânicos vegetais e animais (Kiehl, 1985). No entanto, é necessário saber a quantidade de nutrientes existente nos materiais orgânicos e o tempo necessário para a mineralização (taxa de mineralização) desses nutrientes no solo.

A CQFS/NRS (2004) relaciona valores de mineralização média dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio no solo de diferentes materiais orgânicos sólidos e líquidos, determinados em trabalhos de pesquisa nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. São destacadas diferenças referentes às características físicas (líquida ou sólida) e químicas (teor de lignina, fibras e relação C:N). Em geral, os adubos orgânicos sólidos apresentam maior teor de fibras, carbono orgânico e menor taxa de mineralização de nutrientes em relação aos adubos orgânicos líquidos (por ex. dejetos de suínos). Por outro lado, favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo, considerando-se uma mesma quantidade de adição de matéria seca (CQFS/NRS, 2004).

O próprio processo de bioestabilização ou tratamento de dejetos orgânicos condiciona a decomposição/mineralização das frações orgânicas facilmente decomponíveis e a permanência de frações mais recalcitrantes nos materiais, reduzindo os teores de N solúvel e total nos resíduos (Epstein et al., 1978). A simples observação dos teores de nutrientes na caracterização química de diferentes adubos orgânicos, desconsiderando-se a taxa de mineralização dos materiais, pode ocasionar erros na recomendação de adubação de culturas agrícolas.

A disponibilidade de nutrientes às plantas depende das diferentes frações orgânicas adicionadas ao solo e das correspondentes resistências à mineralização (Ernani, 1984; Kiehl, 1985). A fração dos nutrientes que não é disponibilizada para a primeira cultura, constitui o efeito residual do fertilizante

orgânico, que pode ser observado até 18 meses (terceiro cultivo) após a aplicação dos resíduos ao solo (Selbach & Sá, 2004). No entanto, em doses elevadas, pode ser observado que o efeito residual se manifesta por vários anos (Mugwira, 1979; Lund & Doss, 1980).

A fração do adubo orgânico que é mineralizada em cada cultivo, constitui o índice de eficiência do adubo orgânico (Selbach & Sá, 2004).

Pode-se estabelecer que o potássio (e também o cloro e o sódio) determinado nos resíduos orgânicos está prontamente disponível às plantas (índice de eficiência 1,0), por não fazer parte de nenhum composto orgânico que necessite mineralização mediada por microrganismos do solo (CQFS/NRS, 2004; Selbach & Sá, 2004). Outros macronutrientes importantes como nitrogênio e fósforo e também alguns micronutrientes (Cu e Zn) apresentam forte interação com a matéria orgânica e dependem da mineralização mediada por microrganismos do solo (Selbach & Sá, 2004).

A maior parte do nitrogênio e do fósforo presentes nos materiais orgânicos como esterco e dejetos de animais é mineralizada já no primeiro cultivo. Trabalhos de Castellanos e Pratt (1981) e de McCormick et al (1983) (citados por Ernani, 1984), apresentaram resultados de mineralização de nitrogênio em esterco de suínos de 34% e de 54% num período de 10 e 12 semanas, respectivamente. Esses valores são coerentes com os índices médios de eficiência de aproximadamente 0,5 (50%) no primeiro cultivo (6 meses) para os diferentes esterco de animais (CQFS/NRS, 2004; Selbach & Sá, 2004). O fósforo apresenta mineralização ainda mais rápida e possui índice médio de eficiência de aproximadamente 0,8 (80%) no primeiro cultivo. Por outro lado, materiais com características mais recalcitrantes da matéria orgânica, como os biossólidos e o composto de lixo urbano, apresentam índices de eficiência de nitrogênio de aproximadamente 0,2 (20%) no primeiro cultivo (CQFS/NRS, 2004).

A partir da quantidade de RAF's gerados anualmente e de sua caracterização química, apresentada no item Material e Métodos, pode-se estimar que a utilização agrícola possa permitir a reciclagem anual de aproximadamente 665.000 kg de N, 230.000 kg de P_2O_5 , 1.150.000 kg de K_2O , 1.100.000 kg de Ca, 240.000 kg de Mg e 130.000 kg de S, além de micronutrientes.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Apresentação

O efeito da adição de resíduos de agroindústria fumageira (RAF) nas características do solo, nas plantas e na água percolada no perfil do solo foi avaliado em três experimentos, a saber: (I) biodegradação dos resíduos no solo, indicada pela produção de C-CO₂; (II) efeito no sistema solo-planta-água pela aplicação dos resíduos no solo e (III) avaliação da adição dos resíduos no pH e na acidez potencial do solo.

Serão apresentados a seguir os procedimentos analíticos, as metodologias de instalação e de condução dos experimentos e a caracterização dos solos, dos resíduos e dos materiais utilizados no trabalho.

3.2 Caracterização dos solos

Nos Experimentos I, II e III foi utilizado um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico-PVAd (Unidade de mapeamento Itapuã), conforme descrição e classificação pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999; Streck et al., 2002). As amostras foram coletadas em abril e em novembro de 2003, à margem da estrada RS 040, distrito de Águas Claras, no município de Viamão (RS).

O solo da primeira coleta foi utilizado no Experimento I e o da segunda coleta nos Experimentos II e III. Após remoção do material orgânico superficial, o solo foi coletado em duas camadas: de zero a 20 cm e de 20 a 40 cm de profundidade. Após ele foi seco ao sol, sendo a seguir tamisado em peneira com malha de 4 mm de diâmetro de orifícios. As características físico-

químicas do solo da primeira e da segunda coletas são apresentadas na Tabela 1.

No Experimento III, além do solo PVAd, foram utilizados também um Nitossolo Vermelho distroférico latossólico-NVdf (Unidade de mapeamento Estação) e um Argissolo Vermelho distrófico típico-PVd (Unidade de mapeamento São Jerônimo), conforme descrição e classificação pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Brasil, 1973; Embrapa, 1999; Streck et al., 2002).

Tabela 1. Caracterização físico-química dos solos PVAd, PVd e NVdf utilizados nos experimentos I, II e III ⁽¹⁾

Parâmetro	PVAd			PVd	NVdf
	1 ^a Coleta	----- 2 ^a Coleta -----		----- 1 ^a Coleta -----	
	0-20 cm	0-20 cm	20-40 cm	---- 0-20 cm ----	
Argila (g dm ⁻³)	140	140	130	220	> 560
MO (g dm ⁻³)	8	22	4	23	31
pH em água	5,2	5,5	4,8	5,0	4,5
P (mg dm ⁻³)	3,7	4,7	1,6	1,8	2,5
K (mg dm ⁻³)	22	42	14	55	38
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,0	0,0	0,0	0,9	2,2
Ca (cmol _c dm ⁻³)	0,4	2,9	0,3	0,7	2,5
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,3	1,5	0,2	0,4	0,8
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	1,4	2,8	2,2	6,2	9,7
CTC _{pH 7,0} (cmol _c dm ⁻³)	2,2	7,3	2,7	7,4	13,1
V (%)	34	62	20	17	26
m (%)	0,0	0,0	0,0	42,8	39,3
S (mg dm ⁻³)	16	6,4	6,5	nd ⁽³⁾	nd
Zn (mg dm ⁻³)	1,4	2,5	1,3	nd	nd
Cu (mg dm ⁻³)	0,4	0,5	0,5	nd	nd
B (mg dm ⁻³)	0,7	0,4	0,5	nd	nd
Mn (mg dm ⁻³)	11	22	12	nd	nd
Densidade (m v ⁻¹)	1,38	1,35	1,40	1,17	0,88
Capacidade de retenção de umidade (%) ⁽²⁾	7,2	7,4	7,1	12,8	21,8

⁽¹⁾ Conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995)

⁽²⁾ Método da proveta, com determinação da umidade (60 °C)

⁽³⁾ Elemento não determinado

Os solos NVdf e PVd foram coletados na profundidade de zero a 20 cm em área de floresta nativa à margem da RST-471, localidade de Linha Santa Cruz, município de Santa Cruz do Sul (RS) e na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, município de Eldorado do Sul (RS), respectivamente. Foi utilizado o mesmo procedimento para secagem e tamização descrito anteriormente.

3.3 Caracterização dos resíduos orgânicos

Foram utilizados no trabalho dois resíduos sem valor comercial da agroindústria fumageira (RAF): em pó (denominado neste trabalho como RAF P) e em talos (denominado como RAF T), provenientes do processamento das folhas de tabaco. O RAF P é gerado no processamento das folhas de tabaco nas esteiras de debulha (processo de separação dos talos das lâminas das folhas) e nas prensas de corte, sendo retirado do processo pelos sistemas de exaustão e de ventilação e pela varredura do piso da fábrica. O RAF T é gerado numa etapa posterior do processamento, onde são beneficiados os talos provenientes das mesas de debulha, com espessura e comprimento inferiores aos exigidos pelo padrão comercial. Dados do setor industrial indicam produção anual de RAF's de aproximadamente 4% do total de folhas processadas nas agroindústrias. A geração de resíduos depende, principalmente, da qualidade das folhas (posição da folha na planta), do tipo de processo e da eficiência da unidade beneficiadora. São geradas no Brasil aproximadamente 35 000 t de resíduos por ano; sendo a maior parte produzida no pólo industrial da Região do Vale do Rio Pardo (RS).

A maior parte dos resíduos (~ 80%) é proveniente do processamento do tabaco tipo *Virginia*, sendo constituída por RAF P (~ 95%) e, em menor quantidade, por RAF T (~ 5%). Os resíduos utilizados no trabalho foram coletados em abril de 2003 na empresa KBH&C, sediada no município de Vera Cruz (RS).

Além dos RAF's, foram utilizados para comparação no Experimento II, a cama-de-aviário (CDA) e um vermicomposto (VC). A cama-de-aviário foi adquirida em casa agropecuária de Porto Alegre e o VC foi preparado na atividade prática da Disciplina de Biologia do Solo (AGR 03004), da Faculdade

de Agronomia da UFRGS. As características físico-químicas dos materiais orgânicos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização físico-química dos resíduos orgânicos utilizados nos experimentos I, II e III⁽¹⁾

Parâmetro ⁽²⁾	Resíduo orgânico ⁽³⁾			
	RAF P	RAF T	CDA	VC
Umidade (%)	4,5	4,6	9,7	74,6
pH em água	6,5	5,1	7,7	7,3
C orgânico (%)	28,6	33,4	30,6	28,0
N (TKN) (%)	1,9	1,9	1,8	1,8
P (%)	0,29	0,28	1,1	0,62
K (%)	2,5	6,7	1,9	0,62
Ca (%)	3,3	1,5	8,1	1,6
Mg (%)	0,69	0,71	0,55	0,46
S (%)	0,38	0,38	0,40	0,53
Fe (%)	0,95	0,026	0,11	0,54
Cu (mg kg ⁻¹)	24	7	61	46
Zn (mg kg ⁻¹)	64	29	454	221
Mn (mg kg ⁻¹)	699	125	448	885
Na (mg kg ⁻¹)	720	1600	7600	1100
B (mg kg ⁻¹)	29	24	17	20
Pb (mg kg ⁻¹)	< 10	< 10	nd ⁽⁴⁾	nd
Ni (mg kg ⁻¹)	< 5	< 5	nd	nd
Cd (mg kg ⁻¹)	< 2	< 2	nd	nd-
Cr (mg kg ⁻¹)	25	< 3	nd	nd
Relação C:N	15	18	17	16

⁽¹⁾ Conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995);

⁽²⁾ Expresso em material seco a 75 °C, a exceção do pH;

⁽³⁾ RAF P= resíduo em pó de agroindústria fumageira; RAF T= resíduo em talos de agroindústria fumageira; CDA= cama-de-aviário e VC= vermicomposto.

⁽⁴⁾ Dado não disponível (nd)

3.4 Experimento I – Mineralização dos resíduos no solo

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pesquisa em Química e Fertilidade do Solo da UFRGS, no período de 12 de agosto de 2003 a 28 de janeiro de 2004. Foi utilizado no experimento o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), coletado em abril de 2003 no município de Viamão (RS).

3.4.1 Instalação do experimento

Foram comparados doze tratamentos com diferentes adições ao solo de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's) e um tratamento controle para CO₂, especificados na Tabela 3. Foi estudado também o efeito da adição de nutrientes (NPK) na atividade microbiana no tratamento com a dose intermediária de resíduos (15 t ha⁻¹). Os adubos utilizados para os suprimento de N, P₂O₅ e K₂O foram: uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente. Os adubos foram moídos e adicionados nas doses recomendadas para o cultivo de milho: 180 Kg de N ha⁻¹ + 80 Kg de P₂O₅ ha⁻¹ + 90 Kg de K₂O ha⁻¹ (Comissão..., 1994). Foi utilizado um delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições.

As unidades experimentais foram constituídas por potes de vidro com capacidade de 1,5 L, tampa com vedante de borracha e 200 g de solo (em base seca). Os resíduos e os nutrientes foram misturados ao solo seco, adicionando-se a seguir água destilada para atingir aproximadamente 80% da capacidade de retenção de água do solo.

As unidades experimentais foram mantidas em temperatura ambiente e a umidade monitorada pelo peso total do pote. O experimento foi iniciado em 12 de agosto de 2003 e conduzido até o dia 28 de janeiro de 2004, com 163 dias de monitoramento, tendo sido feitas 34 determinações de CO₂ volatilizado, conforme metodologia descrita por Stotsky (1965).

Tabela 3. Tratamentos utilizados no Experimento I

Nº	Tratamento	Dose	Sigla
		---- t ha ⁻¹ ----	
1	Testemunha	0	Test
2	RAF P	5	P 5
3	RAF T	5	T 5
4	RAF P	15	P 15
5	RAF T	15	T 15
6	RAF P	15 + NPK ⁽¹⁾	P 15 + NPK
7	RAF T	15 + NPK ⁽¹⁾	T 15 + NPK
8	RAF P	45	P 45
9	RAF T	45	T 45
10	RAF P	135	P 135
11	RAF T	135	T 135
12	Controle de CO ₂	0	CO ₂

⁽¹⁾ Adubação para a cultura do milho, conforme Comissão... (1994): 180 kg de N ha⁻¹ + 80 kg de P₂O₅ ha⁻¹ + 90 kg de K₂O ha⁻¹.

3.4.2 Determinação da atividade microbiana e da fração mineralizada de carbono

O CO₂ produzido pela atividade dos microrganismos foi coletado em frasco (copo plástico descartável de 50 mL) contendo 20 mL de NaOH (0,5 mol L⁻¹), suportado por uma armação de metal a 10 cm acima do solo. Para quantificação do C-CO₂ foram abertos os potes (inicialmente a cada 24 horas) para retirada dos frascos coletores de CO₂ produzido pela atividade microbiana. O excesso de NaOH foi titulado com HCl (0,5 mol L⁻¹) utilizando-se bureta eletrônica e agitador magnético, após adição de 3 gotas do indicador de fenolftaleína a 1% e de 1,0 mL de BaCl₂ a 35%.

As reações químicas que ocorrem na determinação do CO₂ coletado nos frascos são:



Após cada determinação foi recolocado o frasco contendo 20 mL de NaOH em cada pote. O intervalo para determinação do CO₂ variou conforme o consumo de NaOH, tendo sido inicialmente de 24 horas e aumentando durante a condução do experimento. Foram feitas determinações de CO₂ aos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 17, 21, 24, 27, 31, 34, 40, 44, 48, 52, 56, 59, 65, 72, 79, 86, 93, 100, 107, 114, 121, 142 e 163 dias após o início do experimento. O experimento foi encerrado quando foi observada a estabilização da produção de CO₂.

Para quantificar o C-CO₂ liberado foi utilizada a fórmula:

$$C-CO_2 = (V \text{ branco} - V \text{ amostra}) \times M (\text{HCl}) \times Eq \times FC$$

onde:

C-CO₂ = total de carbono (mg de C kg⁻¹ de solo) liberado na forma de CO₂;

V branco = volume de ácido gasto na titulação da prova em branco, em mL;

V amostra = volume de ácido gasto na titulação da amostra, em mL;

M = molaridade padronizada do HCl;

Eq = equivalente grama do carbono (6);

FC = fator de correção para mg kg⁻¹ de solo (5).

A notação C-CO₂ adotada neste trabalho refere-se ao carbono (C) determinado na forma de CO₂.

A fração mineralizada do carbono (FMC) foi calculada pela fórmula:

$$FMC = \frac{(C-CO_2 \text{ tratamento}) - (C-CO_2 \text{ testemunha})}{C \text{ adicionado no solo}} \times 100$$

(Equação 1)

Onde:

FMC = fração mineralizada do carbono, em %;

C-CO₂ tratamento = quantidade de carbono na forma de CO₂ (mg kg⁻¹ de solo) determinado pela respirometria no tratamento;

C-CO₂ testemunha = quantidade de carbono na forma de CO₂ (mg kg⁻¹ de solo) determinado pela respirometria no tratamento testemunha de solo;

C adicionado = quantidade de carbono adicionado ao solo pelos resíduos (mg kg⁻¹ de solo).

3.5 Experimento II - Efeito no sistema solo-planta-água da aplicação e reaplicação e do efeito residual dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF's)

O experimento foi conduzido a céu aberto na Área Experimental do Departamento de Solos, Campus da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), no período de janeiro a maio de 2004. Foi estudado o efeito imediato da aplicação dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF P e RAF T) no sistema solo-planta-água com a cultura do milho (primeiro cultivo) e o efeito residual e da reaplicação dos mesmos com a cultura do sorgo (segundo cultivo). Foi utilizado o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), coletado em novembro de 2004 (2^a coleta), no município de Viamão (RS).

3.5.1 Instalação do experimento

Foi utilizado como unidade experimental (UE) um tubo de PVC com 650 mm de altura e 250 mm de diâmetro, com capacidade de 32 litros, fechado na extremidade inferior por um disco duplo de compensado naval, fixado por rebites e impermeabilizado com resina epoxi. Um tubo de silicone com 6 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento foi acoplado numa perfuração na parte lateral inferior do vaso, possibilitando a drenagem e a coleta da água de lixiviação. No fundo do vaso foi colocada uma camada de brita lavada de 5 cm de espessura e sobre esta um disco de tela de polietileno com 3 mm de abertura de malha. Acima da camada de drenagem foram acondicionadas as duas camadas de solo, conforme a ordem de coleta a campo.

A camada inferior, com espessura de 30 cm, foi acondicionada com leve pressão para obter aproximadamente a densidade do solo observada no

local de coleta. Acima desta camada, foi colocado mais um disco de tela de polietileno com 3 mm de abertura de malha, sendo a seguir acondicionada a camada superior com espessura de 25 cm. Foi observada pequena variação na espessura da camada superficial devido às características físicas dos resíduos e à adição de diferentes doses em cada tratamento. No tubo de drenagem de cada vaso foi conectado um frasco plástico (PET), com capacidade de dois litros, para coleta e armazenagem da água de lixiviação.

Foram utilizados tratamentos com as adições de adubos minerais, adubos orgânicos, doses crescentes de RAF P e RAF T e a combinação destes com os nutrientes minerais N, P e K (dois a dois), além de cama-de-aviário (CDA) e de vermicomposto (VC), nas quantidades indicadas na Tabela 4. Foi utilizado delineamento experimental de blocos totalmente casualizados com 18 tratamentos e quatro repetições.

Os nutrientes minerais foram adicionados em quantidade 50% superior à recomendada pela Comissão...(1994). Foram utilizados os adubos minerais: nitrogênio (uréia), fósforo (superfosfato triplo) e potássio (KCl). O nitrogênio foi adicionado em cobertura, em solução, em três parcelas: 20%, 40% e 40% da dose utilizada, aos 7, 21 e 35 dias após a semeadura, respectivamente; o fósforo e o potássio foram misturados na camada superior do solo antes da semeadura das culturas. Os resíduos orgânicos foram misturados (quantidades em base seca) na camada superficial do solo, considerando-se para o cálculo o peso de solo equivalente a $2 \times 10^6 \text{ kg ha}^{-1}$.

Foram feitas irrigações periódicas para que a deficiência de água não se constituísse em fator limitante ao crescimento das plantas. A água de lixiviação foi coletada após cada precipitação pluvial de intensidade suficiente para produzir lixiviado em um prazo máximo de 24 horas, conforme metodologia descrita pela CETESB (1988). Em cada coleta de lixiviado, foi medido o volume de cada amostra com proveta graduada e retirada uma sub-amostra de 10% do volume total, sendo esta armazenada em frasco plástico (PET), com capacidade de 500 mL, e a seguir congelada (-5°C).

Tabela 4. Tratamentos utilizados no Experimento II

Nº	Tratamento	Dose de	1º Cultivo	2º Cultivo
		resíduos	(Aplicação)	(Reaplicação)
		t ha ⁻¹	----- % da dose -----	
1	Testemunha	0	0	0
2	NPK + calcário ¹	0	0	0
3	RAF P 7,5	7,5	100	33,3
4	RAF T 7,5	7,5	100	33,3
5	RAF P 15	15	100	33,3
6	RAF T 15	15	100	33,3
7	RAF P 30	30	100	33,3
8	RAF T 30	30	100	33,3
9	RAF P 60	60	100	33,3
10	RAF T 60	60	100	33,3
11	RAF P 15 + NP ¹	15	100	33,3
12	RAF P 15 + NK ¹	15	100	33,3
13	RAF P 15 + PK ¹	15	100	33,3
14	RAF T 15 + NP ¹	15	100	33,3
15	RAF T 15 + NK ¹	15	100	33,3
16	RAF T 15 + PK ¹	15	100	33,3
17	CDA	15	100	33,3
18	VC	20	100	33,3

⁽¹⁾ Dose recomendada de calcário e de nutrientes pela Comissão... (1994) para as culturas do milho (primeiro cultivo) e do sorgo (segundo cultivo).

3.5.2 Primeiro cultivo: milho *Zea mays L.* – Efeito imediato da aplicação de resíduos no sistema solo-planta-água

Os materiais dos tratamentos foram adicionados e homogeneizados na camada superficial do solo, sendo em seguida semeada a cultura do milho em 15 de janeiro de 2004. Foi utilizado o híbrido simples Pioneer 32R21, sendo semeadas oito sementes em cada vaso. Após dez dias da emergência das plântulas foi feito desbaste para três plantas por vaso. Foram feitas três aplicações do inseticida deltametrina para o controle da “vaquinha” (*Diabrotica speciosa*) e da “lagarta-do-cartucho” (*Spodoptera frugiperda*) durante o período de condução da cultura.

A parte aérea do milho foi colhida em 16 de março de 2004, cortando-se o colmo a aproximadamente 1 cm do solo. As plantas de cada repetição foram secas em estufa de ar forçado com temperatura de 60 °C durante 72 horas, sendo após determinada a matéria seca (MS). As plantas de cada repetição foram moídas em moinho de facas e embaladas individualmente para posterior análise dos macronutrientes no tecido, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Após o corte das plantas, foi retirada com trado calador, uma amostra de solo da camada superficial (quatro sub-amostras por vaso). Estas foram secas em estufa de ar forçado durante 48 horas, moídas e preparadas para determinação de macronutrientes, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Durante a condução do primeiro cultivo foram feitas dez coletas de lixiviado, sendo a primeira em 26 de janeiro de 2004 e a última em 05 de março de 2004, apresentando em média 317 mL por coleta. No primeiro cultivo, a precipitação pluvial acumulada, medida em pluviômetro instalado junto à área experimental, foi de 152 mm. Para análise química da água, as amostras foram retiradas do congelador e deixadas em temperatura ambiente durante oito horas. Após descongelamento e a homogeneização das amostras, foi retirada uma alíquota de 40 mL para determinação do nitrogênio mineral (N-NH_4^+ e $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$) em destilador micro-Kjeldahl, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os teores totais de Na, K, Ca e Mg no lixiviado foram determinados no extrato de digestão nítrico-perclórica de 50 mL da amostra homogeneizada, conforme metodologia descrita em Standard Methods (Eaton, 1995). Nas amostras sem digestão foram feitas as determinações dos valores de pH e da condutividade elétrica (CE), conforme descrito por Tedesco et al. (1995).

3.5.3 Segundo cultivo: sorgo *Sorghum bicolor* L. - Efeito residual e da reaplicação dos resíduos no sistema solo-planta-água

O segundo cultivo foi iniciado em 26 de março de 2004. A camada de solo superficial de cada vaso foi removida e homogeneizada. A reaplicação

dos resíduos foi feita em duas das quatro repetições; nas outras duas repetições o solo foi apenas homogeneizado e recolocado nos vasos para avaliação do efeito residual. Nos tratamentos de números 11 a 16 (Tabela 4), com a adição de RAF's e de nutrientes minerais, foi aplicada a dose recomendada de NPK (Comissão..., 1994) em todas as repetições, sendo utilizadas duas repetições para avaliação do valor residual e outras duas para avaliação da reaplicação dos RAF's. No tratamento com adubação mineral (NPK) foi aplicada, nas quatro repetições, a dose recomendada à cultura do sorgo pela Comissão... (1994). A seguir foi semeado o sorgo forrageiro Pioneer 845 F, com oito sementes por vaso. Após dez dias da emergência das plântulas, foi feito desbaste para três plantas por vaso. Foram feitas duas aplicações do inseticida deltametrina (i.a.) para controle da "vaquinha" (*Diabrotica speciosa*) durante o período de condução da cultura.

A parte aérea das plantas foi cortada em 14 de abril de 2004 a aproximadamente 1 cm do solo. As plantas foram secas em estufa de ar forçado com temperatura de 60 °C durante 72 horas, sendo após determinada a matéria seca (MS). As amostras foram moídas em moinho de facas para determinação do teor de macronutrientes no tecido. Após o corte das plantas foi retirada, com trado calador, uma amostra de solo da camada superficial (quatro sub-amostras por vaso). Estas foram secas em estufa com circulação de ar durante 48 horas e moídas para determinação de macronutrientes, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Avaliou-se também a perda de nutrientes no perfil do solo pela coleta da água de lixiviação. Durante a condução do segundo cultivo foram feitas doze coletas de lixiviado, sendo a primeira em 09 de março de 2004 e a última em 10 de abril de 2004, com média de 540 mL por coleta. A precipitação pluvial acumulada durante o período da coleta foi de 244 mm, determinada em pluviômetro instalado junto à área experimental.

As análises de solo, tecido e água (N-mineral, pH e CE) foram feitas conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995); os teores totais de Na, K, Ca e Mg na água de lixiviação foram determinados conforme metodologia descrita em Standard Methods (Eaton, 1995).

3.6 Experimento III - Avaliação da adição dos resíduos no pH e na acidez potencial do solo

Foram feitas incubações de doses crescentes dos resíduos RAF P e RAF T em três solos com diferentes classes texturais, determinando-se, a intervalos regulares, o pH em água e a acidez potencial do solo, estimada pelo método SMP. Foram utilizados os solos: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd), Argissolo Vermelho distrófico (PVd) e Nitossolo Vermelho latossólico distrófico (NVdf), das Unidades de Mapeamento: Itapuã, São Jerônimo e Estação, respectivamente (Brasil, 1973; Streck et al., 2002).

A caracterização dos solos é dada na Tabela 2. Foram utilizados cinco tratamentos com adição de 0, 15, 30, 60 e 120 t ha⁻¹ de RAF P e de RAF T e um tratamento com adição de calcário (produto técnico com relação 3:1 entre CaCO₃ e MgCO₃) na dose recomendada para atingir pH 6,0 pelo método SMP (Comissão...,1994). Foi utilizado delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento.

A incubação foi feita em recipiente de polietileno, com capacidade de um litro. Foram utilizados 400 g de solo (seco) por recipiente, adicionando-se as quantidades de calcário, de RAF P e de RAF T (base seca) correspondentes a cada tratamento. Foi considerado o peso do solo equivalente a 2,0 x 10⁶ kg ha⁻¹. Os resíduos e o calcário foram adicionados e homogeneizados com o solo e, em seguida, adicionada água destilada até atingir aproximadamente 80% da capacidade de retenção de umidade de cada solo. Foi adaptado um tubo de polietileno, de 5 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, em cada recipiente, com o objetivo de manter as trocas gasosas (solo-ambiente) e evitar a saturação de CO₂ nos recipientes.

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pesquisa em Química e Fertilidade do Solo da UFRGS, tendo sido iniciado em 13 de setembro de 2004 e concluído em 03 de dezembro de 2004, num total de 77 dias. Foram feitas determinações do valor do pH em água (1:1) e da acidez potencial estimada pelo método SMP, conforme descrito por Tedesco et al. (1995), aos 3, 7, 14, 21, 35, 49, 63 e 77 dias após início da incubação dos solos. Foi determinado também o valor de neutralização (VN) do RAF P e do RAF P, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A umidade do

solo foi mantida com adição de água destilada, conforme o monitoramento do peso de cada unidade experimental.

3.7 Análise estatística

Os dados dos diferentes parâmetros analisados nos experimentos foram processados com auxílio do sistema de análise estatística do programa computacional Winstat, com a análise de variância pelo teste F. Foram utilizados os testes estatísticos de comparação de médias múltiplas de Tukey e de Duncan, com nível de probabilidade de diferenças estatísticas menor que 5% ($p < 0,05$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento I - Mineralização dos resíduos no solo

A adição de resíduos orgânicos pode aumentar a atividade microbiana no solo devido ao aumento da disponibilidade de energia e de nutrientes aos microrganismos (Stotsky, 1965). Por outro lado, a acidificação e/ou alcalinização excessiva do meio e a toxidez de algumas moléculas e/ou seus metabólitos podem inibir o crescimento microbiano e reduzir a atividade microbiana basal determinada pelo método da respirometria (Musumeci, 1992).

No experimento de incubação com adição de doses crescentes dos resíduos de agroindústria fumageira em pó (RAF P) e em talos (RAF T) no solo, foram determinados: atividade microbiana, taxa de biodegradação de carbono, mineralização de nitrogênio, valores de pH e teores de carbono orgânico do solo.

4.1.1 Atividade microbiana

O tabaco possui na sua composição mais de 2700 substâncias diferentes, entre estas, alcalóides tóxicos como a nicotina ($C_{10}H_{14}N_2$), principalmente na forma de sulfato de nicotina, utilizado como pesticida agrícola (Tifac, 2004). Embora o teor de nicotina nos resíduos possa variar entre 1,0 a 6,5%, não foi observada redução da atividade microbiana com o aumento da quantidade de resíduos adicionada (Figura 1). A Figura 2 indica que houve aumento linear do $C-CO_2$ produzido com aumento das doses de

resíduos aplicadas. Metabólitos da oxidação da nicotina, como o ácido nicotínico (niacina) ou nicotinamida (Vit B3), podem ser utilizados em rotas metabólicas (Ciclo de Krebs) como fatores de crescimento e multiplicação celular, como a nicotinamida adenina dinucleotídeo (NAD) e a nicotinamida adenina dinucleotídeo fosfato (NADP) (QCM-UFSC, 2004).

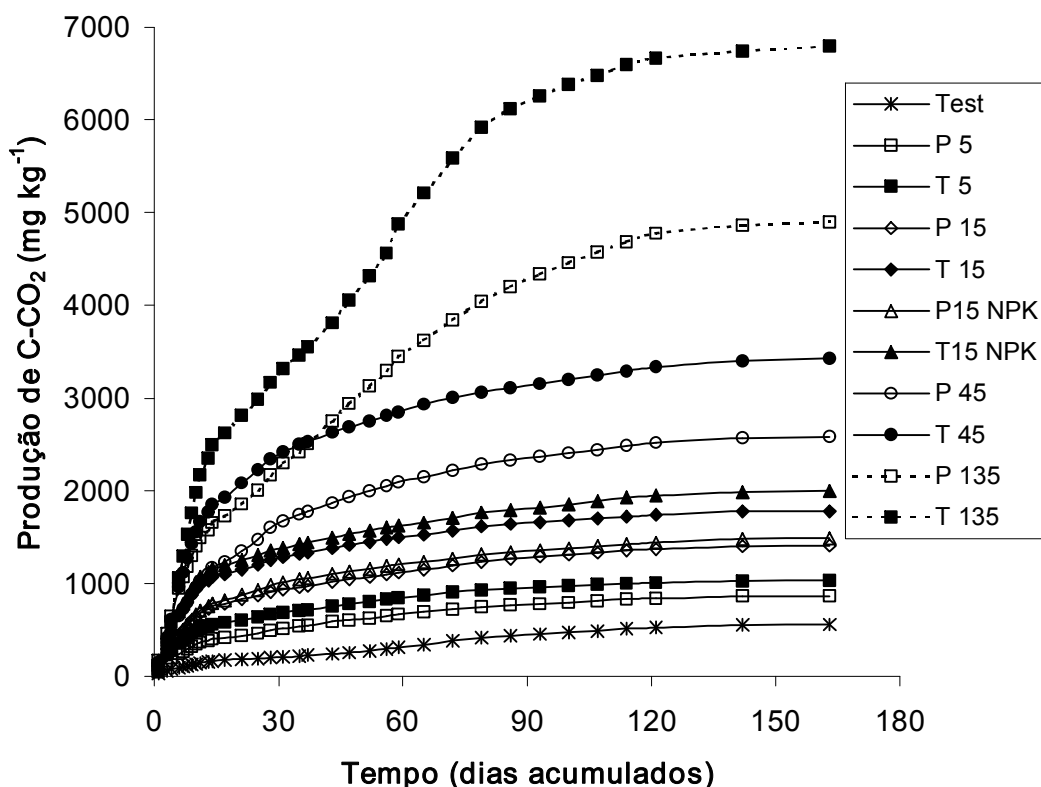


Figura 1. Curvas de produção acumulada de C-CO₂ durante a condução do Experimento I (média de três repetições). As letras P e T correspondem ao RAF em pó (RAF P) e em talos (RAF T), respectivamente. O número corresponde à quantidade de resíduos adicionada (t ha⁻¹).

A atividade microbiana, determinada pela evolução de CO₂, aumentou em todos os tratamentos testados no experimento, tanto para o RAF P como para o RAF T (Figura 1). Não foi observada inibição na produção de CO₂, mesmo com a adição de 135 t ha⁻¹ de ambos os resíduos. Foi observada também a tendência de maior produção de C-CO₂ nos tratamentos com adição de RAF T em relação às mesmas doses adicionadas de RAF P.

Nas primeiras duas semanas foram determinados aumentos exponenciais da produção de CO₂ (fase log). A estabilização da atividade microbiana foi verificada após a décima segunda semana nos tratamentos com maior dose de resíduos(Figura 1 e Apêndice 1).

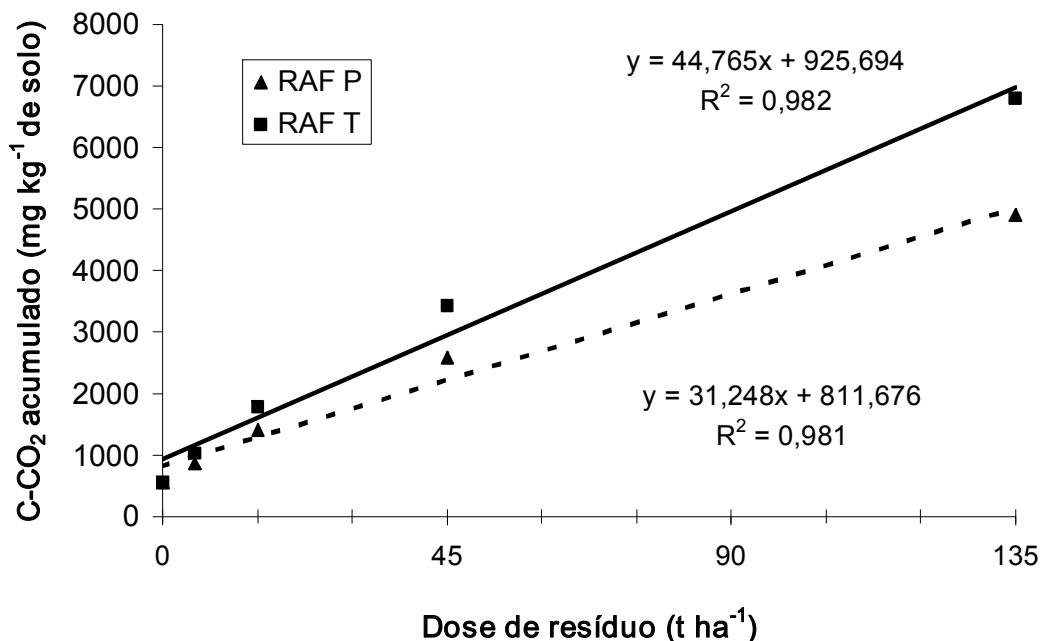


Figura 2. Relação entre produção de C-CO₂ acumulada ao final do experimento e a dose de RAF adicionada (média de três repetições).

4.1.2 Fração mineralizada de carbono (FMC)

Foram determinadas, conforme a Equação 1, as frações mineralizadas do carbono (FMC's) adicionado com os resíduos. As FMC's variaram de 22,5 até 57,5 % nos tratamentos com adição de RAF's (Figura 3). Pode-se observar que as FMC's foram significativamente maiores nos tratamentos com menor adição de resíduos, apesar da produção de C-CO₂ ter apresentado uma relação linear e aproximadamente proporcional à adição dos resíduos no solo (Figura 2).

Nos tratamentos com adição de grande quantidade de resíduos pode ter ocorrido alta demanda de O₂ no solo e a conseqüente formação de microsítios de anaerobiose, determinando menores FMC's (Guenzi et al., 1978;

Ernani, 1981; Segatto, 2001). A FMC nos tratamentos como maior adição de resíduos pode também ter sido influenciada negativamente pelo aumento excessivo no pH do solo, como será discutido no ítem 4.1.5.

O RAF T apresentou frações mineralizadas significativamente maiores que o RAF P, à exceção dos tratamentos com adição de 135 t ha^{-1} de resíduos. Embora o RAF T apresente relação C:N e tamanho de partículas maiores que o do RAF P, sua maior mineralização pode ser atribuída à formação de microsítios aeróbios no solo, possibilitando melhores condições de oxidação pelos microrganismos (Cardoso et al., 1992; Moreira & Siqueira, 2002).

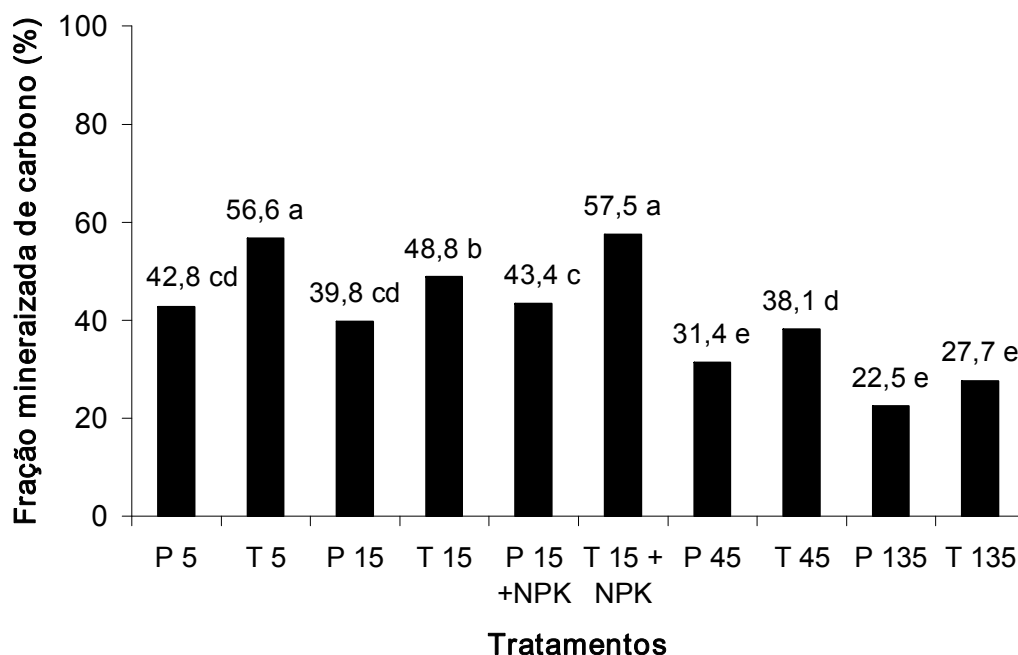


Figura 3. Fração mineralizada do carbono adicionado no solo pelos resíduos RAF P e RAF T (média de três repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A adição de nutrientes (NPK) aumentou significativamente a decomposição do RAF T (na dose de 15 t ha^{-1}) em relação à mesma dose de resíduos sem adição dos nutrientes (Figura 3). Este fato pode ser atribuído à maior disponibilidade de nitrogênio e fósforo, proporcionando o estímulo da mineralização do carbono no solo pela biomassa microbiana (Victória et al., 1992; Segatto, 2001; Moreira & Siqueira, 2002).

4.1.3 Teores de carbono orgânico do solo

Os teores de carbono orgânico do solo variaram de 4,65 até 13,37 g kg⁻¹ de solo (Figura 4). Em geral, os teores de carbono orgânico do solo, determinados ao final do experimento, foram coerentes com a atividade microbiana determinada pela respirometria.

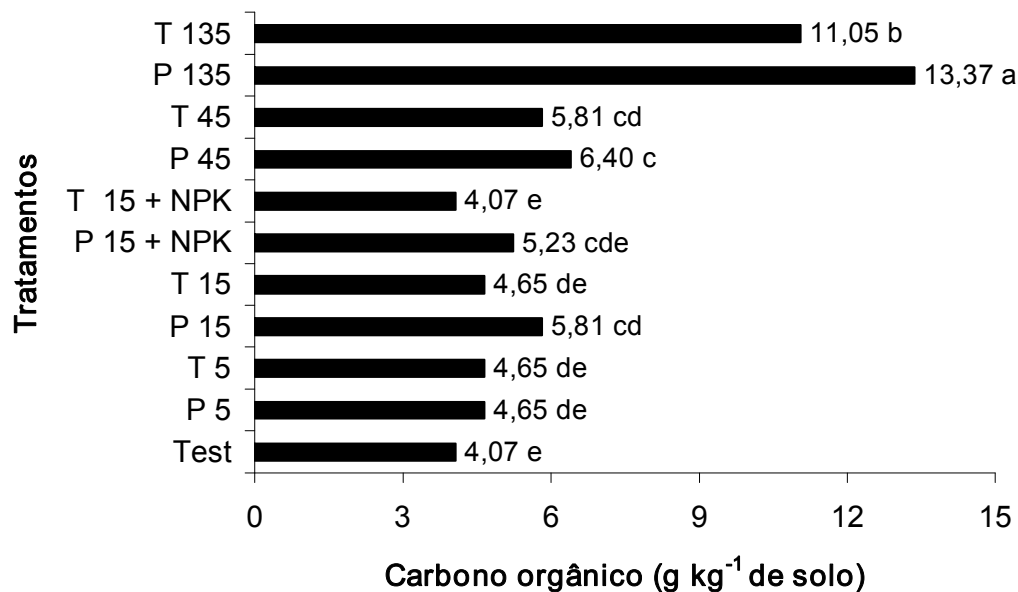


Figura 4. Teores de carbono orgânico no solo ao final do Experimento I (média de três repetições)
Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Conforme os resultados (Figura 4), pode ser observada a tendência de maior acúmulo de carbono orgânico nos tratamentos com adição de RAF P, que por sua vez apresentaram menor atividade microbiana (Figura 1). Também pode ser observado que o aumento no teor de C orgânico do solo não foi estatisticamente significativo na maioria dos tratamentos com adição de até 15 t ha⁻¹ dos resíduos. Este fato pode ser atribuído à baixa relação C:N dos RAF's e à facilidade de mineralização do carbono pelos microrganismos do solo.

1.4 Nitrogênio mineral

Na Figura 5 são apresentados os valores de N mineralizado nas forma de amônio (NH_4^+) e de nitrito + nitrato ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$). Foram determinados valores variando de 2,5 a 67,0 mg de amônio kg^{-1} de solo e de 2,7 até 89,6 mg de nitrito + nitrato kg^{-1} de solo.

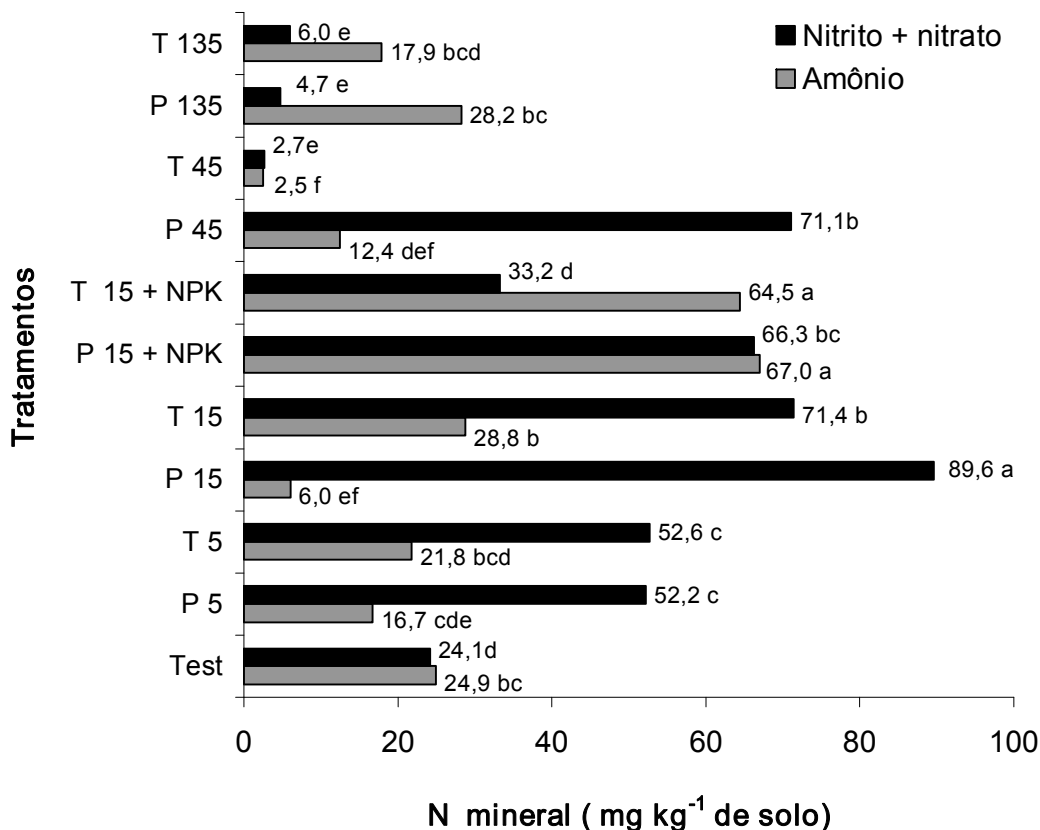


Figura 5. Nitrogênio mineralizado no solo ao final do experimento (média de três repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Com adição de 15 t ha^{-1} de RAF's foi determinada a mineralização de aproximadamente 100 kg ha^{-1} de N; considerando-se uma taxa de mineralização média de 40%, os valores deveriam ser de aproximadamente 110 kg ha^{-1} de N, o que demonstra boa concordância entre os valores obtidos e os esperados. Foi observado acúmulo de nitrito + nitrato no solo até a dose de 45 t ha^{-1} de RAF P. Nos tratamentos com adição de 45 t ha^{-1} de RAF T e de 135 t ha^{-1} de ambos os resíduos, o acúmulo de N mineral foi baixo, mesmo

tendo sido determinadas FMC's maiores que 30 e de 20%, respectivamente (Figura 3). Este fato pode ser devido a perdas de N mineral do solo. As perdas podem ser atribuídas a: a) estabelecimento de condições de anaerobiose, provocando perdas por desnitrificação, favorecidas pela grande disponibilidade de carbono facilmente decomponível e baixa difusão de O₂ (Guenzi et al., 1978; Victoria et al., 1992; Segatto, 2001) e b) por volatilização de amônia, em condições de pH alcalino (pH > 8,0) (Kiehl, 1985; Victoria et al., 1992; Camargo & Sá, 2004), conforme será discutido a seguir.

4.1.5 Valores de pH do solo

Na Figura 6 são apresentados os valores de pH em água (1:1) determinados ao final do experimento de incubação. Os valores de pH variaram de 6,0 até 10,3 nos tratamentos com adição de RAF's. Foi observado que houve aumento de pH em todos os tratamentos com adição de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's). Os tratamentos com adição de RAF T apresentaram acréscimos de pH significativamente maiores do que aqueles com adição de RAF P nas doses acima de 5 t ha⁻¹ de resíduos. Nos tratamentos com adição de nutrientes, pode ser observado que os valores de pH foram significativamente maiores do que nos sem adição de NPK, devido possivelmente à menor nitrificação e aos teores mais altos de amônio (Figura 5). Os valores de pH foram excessivamente altos (pH > 10) nos tratamentos com adição de 45 e 135 t ha⁻¹ de RAF T.

Conforme Kiehl (1985), resíduos orgânicos decompostos em condições aeróbias possuem reação alcalina no solo, formando humatos que podem elevar o pH, pelos menos temporariamente. Em geral, os RAF's mostraram efeito alcalino prolongado (163 dias do experimento) no solo PVAd. Entretanto, deve-se considerar que o experimento foi conduzido em condições controladas (em laboratório). Uma discussão mais ampla do efeito alcalino dos resíduos será feita no Experimento III.

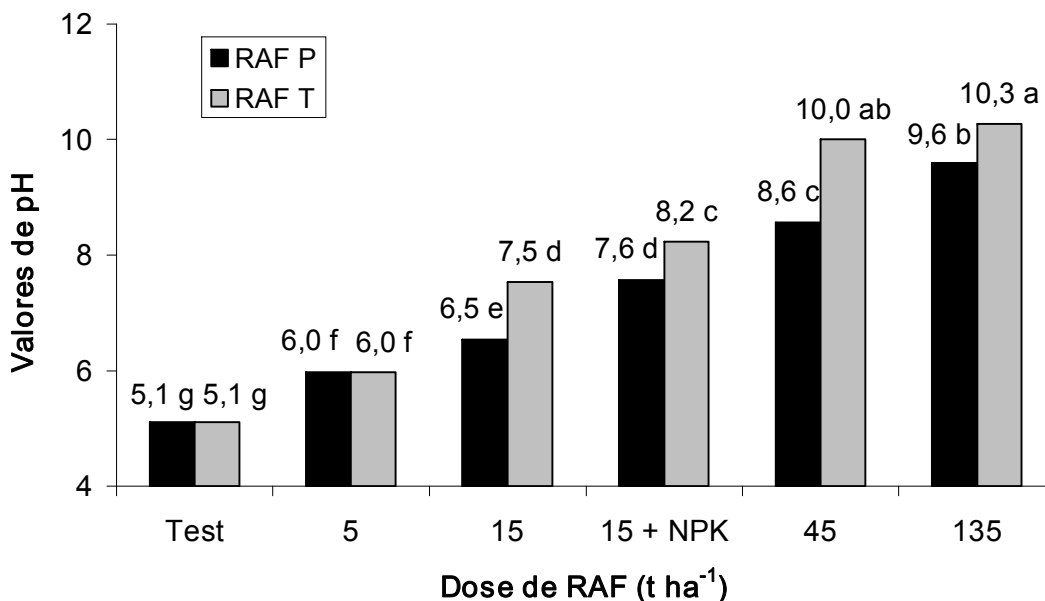


Figura 6. Valores de pH em água (1:1) determinados ao final do experimento de incubação (média de três repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.2 Experimento II - Efeito no sistema solo-planta-água da aplicação e da reaplicação e do efeito residual dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF's)

4.2.1 Efeitos imediatos da aplicação dos resíduos

Neste item serão apresentados e discutidos os efeitos da aplicação imediata dos resíduos RAF P e RAF T (RAF's) no solo, em relação ao sistema solo-planta-água no primeiro cultivo (milho).

4.2.1.1 Efeitos no crescimento das plantas

Conforme pode ser observado na Figura 7, todos os tratamentos com adição de resíduos e/ou de adubos minerais apresentaram rendimentos de matéria seca (MS) de milho significativamente maiores que o determinado no tratamento testemunha. Os tratamentos com até 15 t ha⁻¹ de RAF T e até 30 t ha⁻¹ de RAF P apresentaram rendimentos semelhantes aos obtidos com a adubação mineral e com a adição de 20 t ha⁻¹ de vermicomposto. O acréscimo na quantidade de MS nestes tratamentos foi de aproximadamente 500%, evidenciando a baixa fertilidade natural do solo e o potencial fertilizante dos resíduos (Apêndice 2).

Foi verificado que o tratamento com adição de cama-de-aviário (CDA) proporcionou o maior rendimento de MS. Isso foi atribuído à grande quantidade de nutrientes adicionados (aproximadamente 270 kg ha⁻¹ de N, 380 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 370 kg ha⁻¹ de K₂O) e às características de precocidade da variedade do milho híbrido utilizado. Híbridos precoces e superprecoces necessitam de solos férteis e grandes quantidades de nutrientes para expressarem seu potencial genético desde o início do ciclo de desenvolvimento (Recomendações..., 1998).

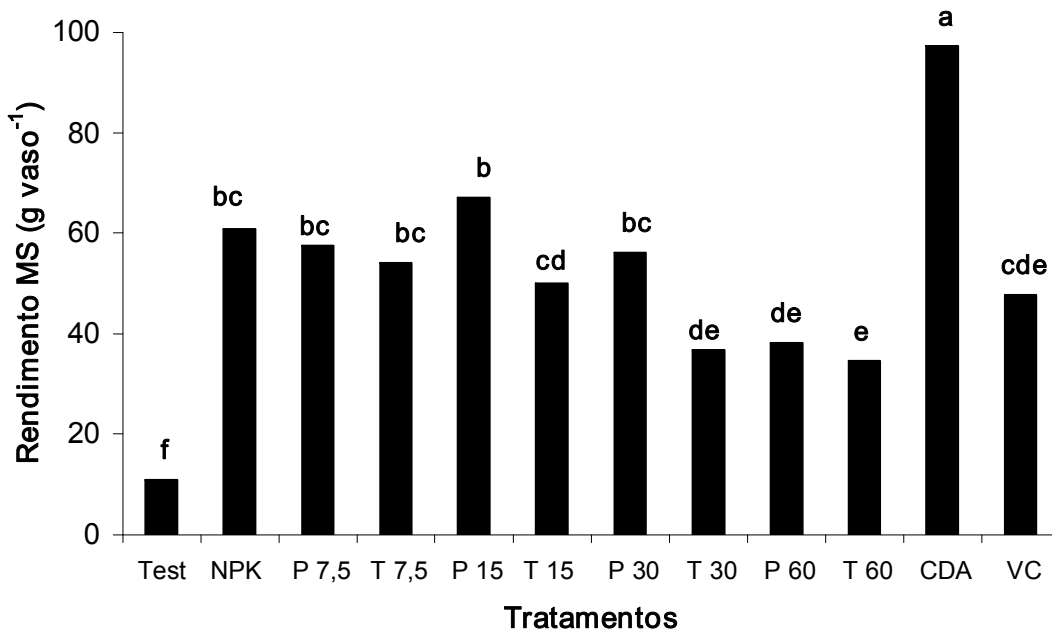


Figura 7 - Rendimento de matéria seca (MS) na parte aérea do milho nos tratamentos com a adição de doses crescentes dos resíduos (médias de quatro repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Conforme observações de campo, a resposta em crescimento das plantas com adição da CDA foi observada já na segunda semana de cultivo, enquanto que, com a aplicação do RAF P e do RAF T isto foi observado somente a partir da terceira e da quarta semanas, respectivamente. Esse fato foi mais evidente nos tratamentos com 60 t ha^{-1} dos RAF's, cujas plantas apresentaram pequeno desenvolvimento inicial e sintomas de deficiência de fósforo e de nitrogênio. Isso pode ter ocorrido devido à baixa mineralização inicial de nutrientes e à grande quantidade de resíduos adicionada ao solo.

Durante a condução do experimento foi observada recuperação no crescimento das plantas. Entretanto, deficiências nutricionais no início da fase de crescimento do milho são difíceis de serem compensadas, além de haver encurtamento do ciclo e maturação precoce das plantas (Rajj, 1991). Os dados de rendimento de MS obtidos nos tratamentos com adição do RAF P e do RAF T (Figura 7) corroboram esta observação, uma vez que a adição de 60 t ha^{-1} desses resíduos promoveu apenas aproximadamente 60% do rendimento determinado nos tratamentos com a dose de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$, apesar da quantidade total de nutrientes adicionada ter sido oito vezes maior.

Foi observada tendência de maior rendimento de MS nos tratamentos com adição do RAF P em relação ao RAF T, o que é coerente com os dados de mineralização de nitrogênio e com os valores de pH determinados no Experimento I. Por outro lado, o rendimento de MS do milho apresentou tendência de diminuição com adição de doses maiores que 15 t ha^{-1} do RAF P e $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ do RAF T (Figura 7).

Na Figura 8 são apresentados os rendimentos de MS de milho no tratamento com a dose de 15 t ha^{-1} dos resíduos e as adições dos nutrientes minerais nitrogênio, fósforo e potássio (dois a dois). Não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos com a adição somente dos resíduos RAF P e RAF T e de resíduos mais os nutrientes minerais. Entretanto, pode ser observado, para ambos os resíduos, que os tratamentos com a adição de fósforo na forma mineral mostraram uma tendência de aumento no rendimento de MS.

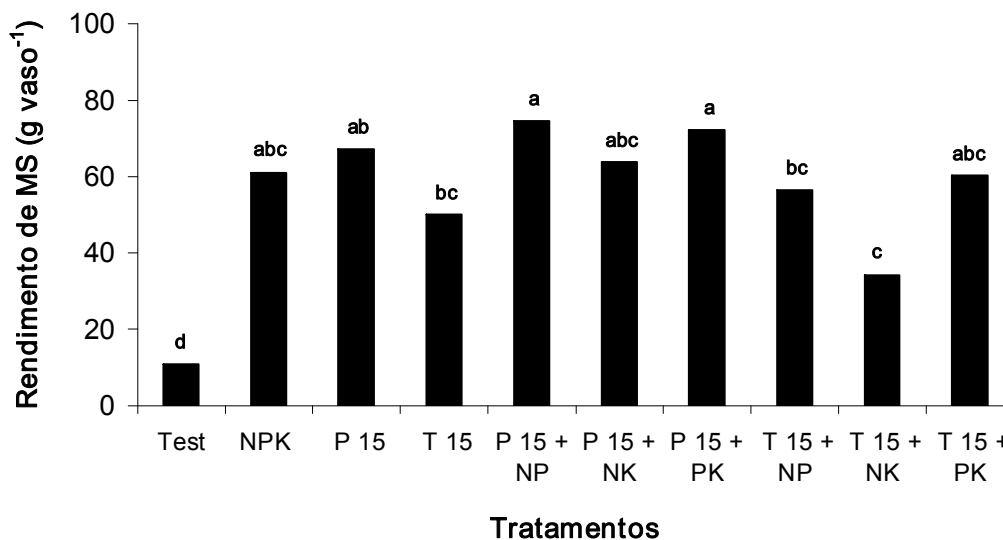


Figura 8. Rendimento de MS de milho nos tratamentos com a dose de 15 t ha⁻¹ dos RAF's e nutrientes minerais (médias de quatro repetições). Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O efeito do fósforo no rendimento de MS de milho foi mais evidente nos tratamentos com adição do RAF T. Lauschner et al. (2004), trabalhando com o mesmo solo e com adição de diferentes resíduos orgânicos, observaram que o fósforo foi o nutriente mais limitante ao rendimento de MS das plantas.

4.2.1.1.1 Efeitos no índice de eficiência agrônômica (IEA)

O índice de eficiência agrônômica (IEA) é um parâmetro utilizado para avaliar a capacidade dos nutrientes em promover respostas de rendimento de MS ou de outro parâmetro de planta que se deseje avaliar, em relação a um tratamento de referência. Conforme Rajj (1991), o IEA expressa a porcentagem de aumento de produção proporcionada pelo adubo testado em relação ao aumento proporcionado pelo adubo considerado padrão. É calculado pela equação:

$$IEA = (Y_2 - Y_0 / Y_1 - Y_0) \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

Y_0 = rendimento de MS determinado no tratamento testemunha;

Y_1 = rendimento de MS determinado no tratamento com NPK;

Y_2 = rendimento de MS determinado no tratamento testado.

Tabela 5. Índice de eficiência agrônômica (IEA) dos tratamentos (média de quatro repetições)

Tratamento	Dose dos resíduos ---- t ha ⁻¹ ----	Nutriente mineral ⁽¹⁾	Índice de eficiência agrônômica (IEA) --- % ---
CDA	15	----	172,7
RAF P	15	NP	127,3
RAF P	15	PK	122,5
RAF P	15	----	112,5
RAF P	15	NK	105,5
NPK + calcário ¹	0	NPK	100,0
RAF T	15	PK	98,5
RAF P	7,5	----	93,2
RAF T	15	NP	91,2
RAF P	30	----	90,5
RAF T	7,5	----	86,5
RAF T	15	----	78,3
VC	20	----	73,6
RAF P	60	----	54,5
RAF T	30	----	51,6
RAF T	60	----	47,3
RAF T	15	NK	46,3
Testemunha	0	----	----

⁽¹⁾ Dose recomendada de calcário e nutrientes + 50% pela Comissão... (1994) para a cultura do milho (primeiro cultivo).

Apesar da Equação 2 ter sido utilizada por Raj (1991) para avaliar fontes de nutrientes, a mesma foi adaptada neste trabalho para comparar os diferentes tratamentos do experimento. O rendimento com adição da dose recomendada de NPK + 50% e de calcário para o solo PVAd (Comissão..., 1994) foi considerado como padrão neste cálculo.

Todos os tratamentos com adição do RAF P na dose de 15 t ha^{-1} apresentaram eficiência maior que 100% (Tabela 5). Por outro lado, os tratamentos com RAF T, na mesma dose, apresentaram índices menores que 100%, variando entre 46,3 a 98,5%. O tratamento com a adição do RAF T (15 t ha^{-1}) + NK, apresentou rendimento de MS menor que o esperado. A hipótese de erro experimental, foi descartada, pelo fato das quatro repetições apresentarem rendimentos de MS semelhantes. Devido à elevada quantidade de adubos minerais adicionados neste tratamento, acrescida de mais de 1200 kg de K_2O adicionados com o resíduo, é possível que tenha ocorrido um aumento da concentração salina na solução do solo, possivelmente causando desbalanço na absorção de outros nutrientes e conseqüentemente menor rendimento de MS.

4.2.1.1.2 Curvas de resposta das plantas à adição dos resíduos

A adição de nutrientes ao solo pode afetar o crescimento vegetal e o rendimento de MS, de grãos ou de outros parâmetros de planta (Raij, 1991). Na Figura 9 são apresentadas as curvas de resposta determinadas para a adição dos resíduos ao solo, ajustadas para as doses de até 30 t ha^{-1} . Pode ser observado que a resposta de rendimento de MS variou conforme a dose e o tipo de RAF adicionado ao solo. Foram encontradas diferenças na produção de MS entre os resíduos a partir da dose de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$.

Os resultados obtidos indicam que as doses de máxima eficiência técnica (MET) foram de $19,2 \text{ t ha}^{-1}$ e de $17,4 \text{ t ha}^{-1}$, para o RAF P e RAF T, respectivamente. Com base na curva de resposta e na sua inflexão (ponto crítico), a produção máxima de MS de milho poderia ser obtida com a aplicação de doses entre 15 e 20 t ha^{-1} (Figura 9), para ambos os resíduos. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Czekata et al. (2002) trabalhando com a adição de resíduos de tabaco como fonte de nitrogênio às plantas.

Entretanto, como pode ser observado nos resultados (Figura 9), as curvas quadráticas possuem tendência de superestimar os pontos de máxima resposta. Este fato é mais evidente em relação à adição do RAF T. Pode-se observar que a diminuição de rendimento MS assume uma característica

aproximadamente linear a partir da dose de 7,5 t ha⁻¹ do RAF T. Este fato reforça a hipótese de problemas nutricionais nas plantas, causados pelo aumento excessivo na concentração de potássio e/ou ao aumento de pH na solução do solo devido ao aumento da adição desse resíduo.

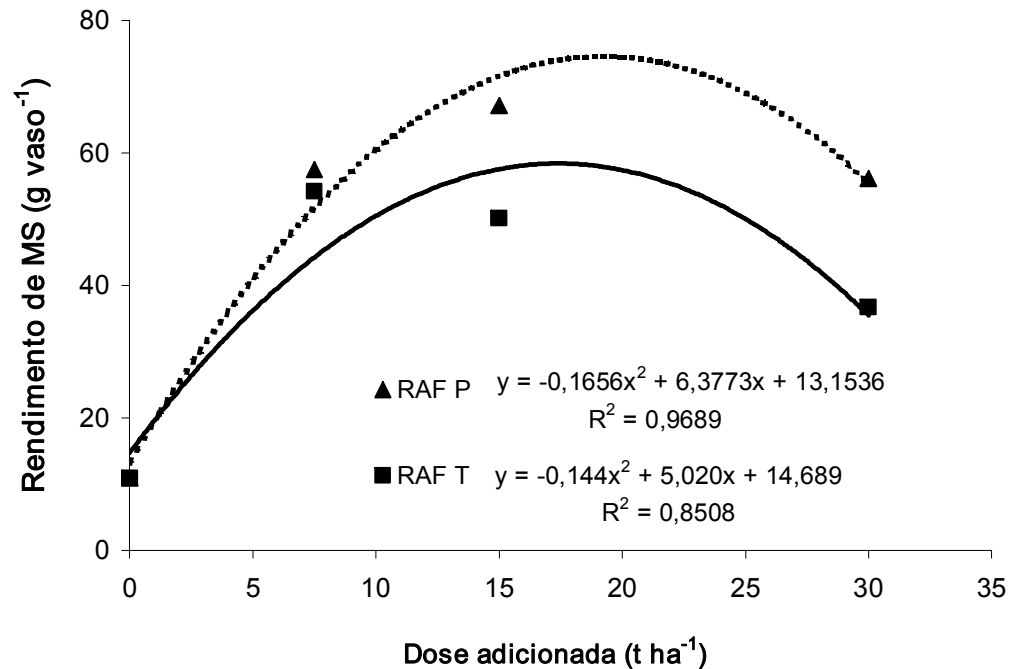


Figura 9. Curvas de resposta em rendimento de matéria seca (MS) do milho para as adições de até 30 t ha⁻¹ dos resíduos RAF P e RAF T.

4.2.1.2 Efeitos da aplicação dos resíduos no solo

A adição de doses crescentes dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF P e RAF T) modificou os teores de nutrientes e de outros atributos do solo. Serão apresentados e discutidos a seguir os indicadores de química e de fertilidade do solo avaliados neste experimento.

4.2.1.2.1 Teores de matéria orgânica e indicadores da reação do solo

Em geral, foi observado um decréscimo nos teores de matéria orgânica do solo (MOS) em relação ao seu teor inicial (Tabela 6). Esse fato pode ser devido à intensa mobilização do solo para a homogeneização e aplicação dos tratamentos, favorecendo a decomposição da fração orgânica e a mineralização de nutrientes. Por outro lado, pode ser verificado, em relação ao solo do tratamento testemunha, que os teores de MOS apresentaram tendência de aumento com a adição dos RAF's.

O tratamento com adição de 60 t ha⁻¹ de RAF P apresentou aumento superior a 200% no teor de MOS. Entretanto, é possível que parte da fração do carbono orgânico determinada neste tratamento seja facilmente degradável. A tendência de menor teor de MOS nos tratamentos com adição de RAF T foi coerente com os resultados determinados para a fração mineralizada de carbono no Experimento I.

Os valores de pH aumentaram conforme o aumento da dose aplicada de resíduos (Tabela 6). À semelhança dos resultados obtidos no Experimento I, foi observada tendência de maiores acréscimos de pH nos tratamentos com RAF T. Nas doses de 30 e de 60 t ha⁻¹ de resíduos, o pH do solo foi maior que 7,0, portanto, acima da faixa adequada para as principais culturas agrícolas (CQFS, 2004).

A acidez potencial (H + Al) diminuiu em relação ao tratamento testemunha (Tabela 6). Foi determinado nos tratamentos com adição de RAF's níveis iguais e/ou menores que o determinado no tratamento com adição de calcário na quantidade recomendada pela Comissão... (1994). Em geral, apesar do aumento do teor de MOS, a acidez potencial diminuiu nos tratamentos com adição do RAF P e do RAF T.

A saturação por bases (V%) aumentou com adição dos resíduos (Tabela 6), sendo em geral semelhante entre os dois resíduos. Nas doses mais elevadas (30 e 60 t ha⁻¹) de resíduos, a saturação por bases foi, aproximadamente, maior que o dobro da determinada no tratamento testemunha. O aumento da saturação por bases pode ser atribuído ao aporte de cátions básicos (K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) pelos resíduos.

Tabela 6. Caracterização química do solo após o cultivo do milho (médias de quatro repetições)

Tratamento	MOS	pH (H ₂ O)	H + Al	V
	g dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³	--- % ---
Testemunha	13 d	5,4 h	1,9 a	43 f
NPK	15 bcd	6,1 g	1,4 b	63 d
RAF P 7,5	16 bcd	6,2 g	1,4 b	64 cd
RAF T 7,5	14 cd	6,3 fg	1,4 b	63 d
RAF P 15	19 bc	6,8 cde	1,1 cde	75 b
RAF T 15	16 bcd	6,9 cd	1,1 cde	75 b
RAF P 30	18 bcd	7,5 b	0,9 ef	83 a
RAF T 30	19 bcd	7,6 b	0,9 ef	83 a
RAF P 60	28 a	7,7 b	0,8 f	89 a
RAF T 60	20 bc	8,0 a	0,8 f	88 a
RAF P 15 + NP	21 b	6,7 def	1,2 bc	71 bc
RAF P 15 + NK	18 bcd	6,5 fg	1,2 bc	71 bc
RAF P 15 + PK	19 bc	7,0 c	1,1 cdef	75 b
RAF T 15 + NP	18 bcd	6,6 ef	1,2 c	73 b
RAF T 15 + NK	16 ncd	6,5 f	1,2 c	73 b
RAF T 15 + PK	17 bcd	7,0 f	1,1 cd	73 b
CDA 15	21 ab	6,8 cde	1,2 bc	75 b
VC 20	16 bcd	5,7 h	1,9 a	55 e

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.2.1.2.2 Disponibilidade de macronutrientes no solo

Serão apresentados neste item os efeitos da adição dos resíduos RAF P e RAF T na disponibilidade de macronutrientes nas amostras de solo coletadas após a corte da matéria seca (MS) do milho.

4.2.1.2.2.1 Teores de fósforo

Conforme pode ser verificado na Figura 10, os teores de fósforo (P) disponível no solo não apresentaram aumento significativo até a dose de 15 t ha⁻¹ de resíduos de agroindústria fumageira (RAF P e RAF T).

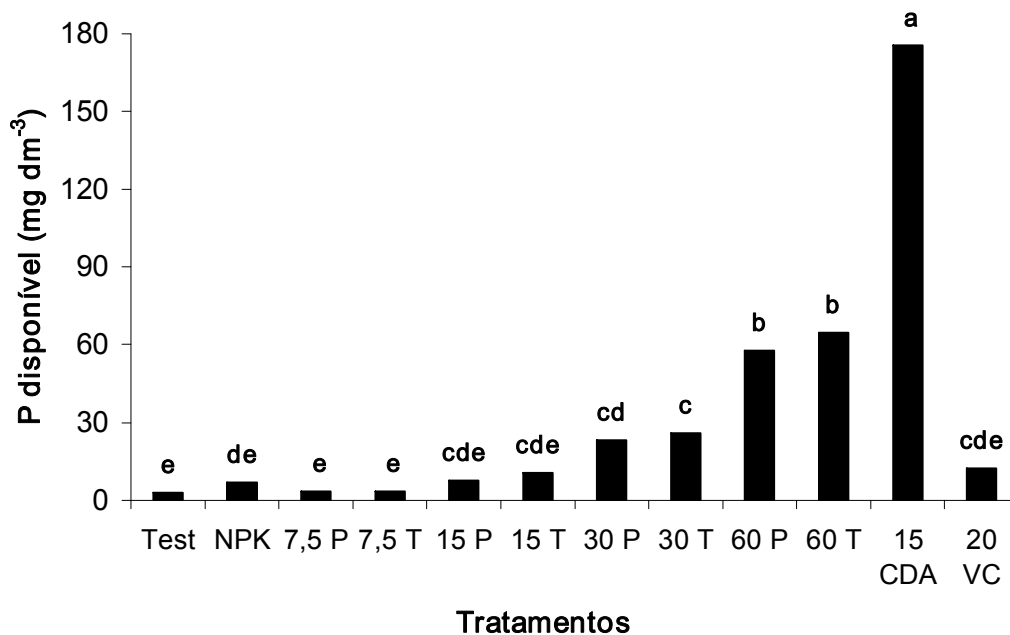


Figura 10. Fósforo disponível (extraído pela solução Melich-1) no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições)
Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Entretanto, com a adição das doses de 30 e de 60 t ha⁻¹, de ambos os resíduos, os teores de P disponível atingiram o nível de suficiência e passaram à classe de interpretação “alta” e “muito alta” no solo, respectivamente (CQFS/NRS, 2004). Foi verificado que a CDA possui grande potencial para aumentar os teores de fósforo disponível no solo PVAd.

As curvas de aumento dos teores de P no solo com a adição dos resíduos (Figura 14) indicam que aproximadamente 2,0 t ha⁻¹ de RAF T e 2,5 t ha⁻¹ de RAF P podem aumentar em 1,0 mg dm⁻³ o teor de fósforo disponível no solo PVAd.

4.2.1.2.2 Teores de potássio

Os teores de potássio (K) trocável aumentaram com as doses de RAF's adicionadas ao solo. Os acréscimos foram maiores com adição do RAF T em relação ao RAF P (Figura 11). Pode-se verificar que a dose de 7,5 t ha⁻¹ de RAF T proporcionou aumento do teor de K trocável no solo para a faixa de interpretação "muito alto", atingindo o nível de suficiência para o solo PVAd (CQFS/NRS, 2004). Doses maiores deste resíduo determinaram maior saturação de K trocável na CTC_{pH 7,0}. Este fato pode reduzir a absorção de outros cátions como cálcio e magnésio.

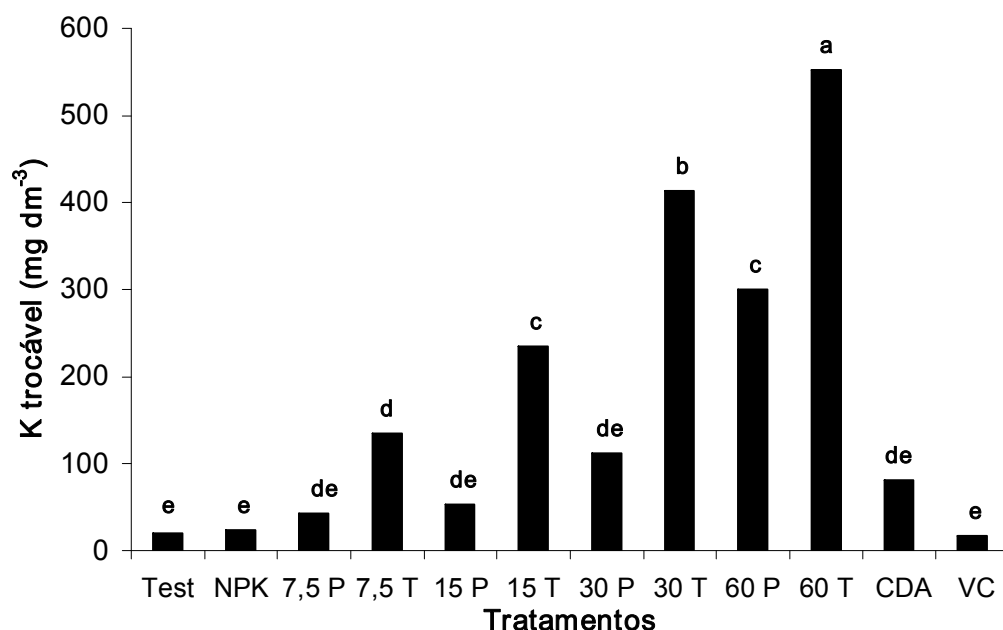


Figura 11. Potássio trocável determinado no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições). Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Entretanto, conforme Tisdale et al. (1993), a quantidade de Mg absorvida pelas plantas pode ser afetada quando a razão K/Mg for superior a cinco; nos tratamentos com RAF T foram determinadas razões sempre inferiores a um. Conforme Usherwood (1982), antagonismos entre a adubação potássica e os íons Ca e Mg podem ocorrer em solos com baixa CTC e deficientes em um ou ambos os nutrientes.

Apesar dos tratamentos com RAF T terem apresentado alto teor de K no solo e no tecido das plantas de milho, os teores de Ca e Mg absorvidos foram considerados normais para a cultura, considerando-se a folha oposta imediatamente abaixo da espiga (CQFS/NRS, 2004). Os teores de macronutrientes no tecido de milho são apresentados no Apêndice 2.

As curvas de aumento dos teores de K no solo com adição dos resíduos (Figura 14) indicam que 1,0 t ha⁻¹ de RAF P e de RAF T aumentaram em aproximadamente 1,5 e 17 mg dm⁻³ de K trocável no solo PVAd, respectivamente. Convém salientar que parte do potássio do sistema solo-planta foi perdida com a retirada da parte aérea das plantas.

4.2.1.2.2.3 Teores de cálcio e de magnésio

Os teores de cálcio e de magnésio trocáveis aumentaram no solo em todos os tratamentos com adição de RAF's (Figura 12). Nos tratamentos com doses maiores que 7,5 t ha⁻¹ foi determinado um aumento significativamente maior de cálcio nos tratamentos com adição de RAF P; por outro lado, foi observado maior acréscimo de magnésio nos tratamentos com RAF T. Conforme a CQFS/NRS (2004), os teores de cálcio determinados no solo com a adição de doses maiores que 15 t ha⁻¹ de RAF P atingiram o nível de suficiência (médio a alto); com a adição de RAF T este nível foi atingido a partir da dose de 30 t ha⁻¹.

Todos os tratamentos com adição de resíduos apresentaram teores de Mg compreendidos nas faixa de interpretação "médio" a "alto" (CQFS/NRS, 2004).

A CTC_{pH 7,0} aumentou linearmente com adição de doses crescentes dos resíduos RAF P e RAF T no solo (Figura 13).

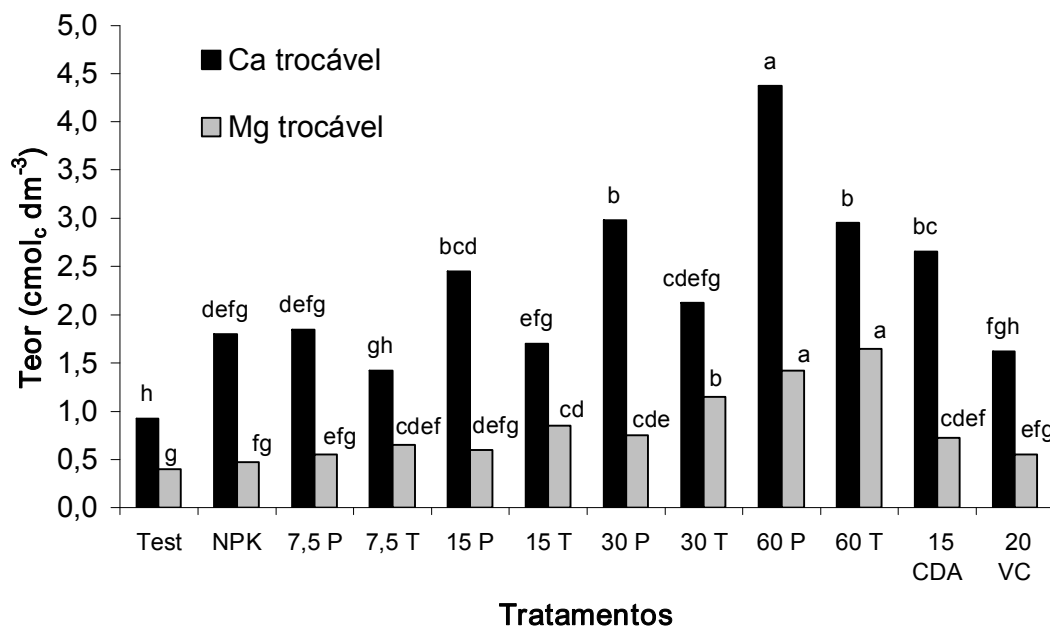


Figura 12. Teores de Ca e Mg trocável determinado no solo após o cultivo de milho (média de quatro repetições). Para cada nutriente, médias acompanhadas de letras iguais não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

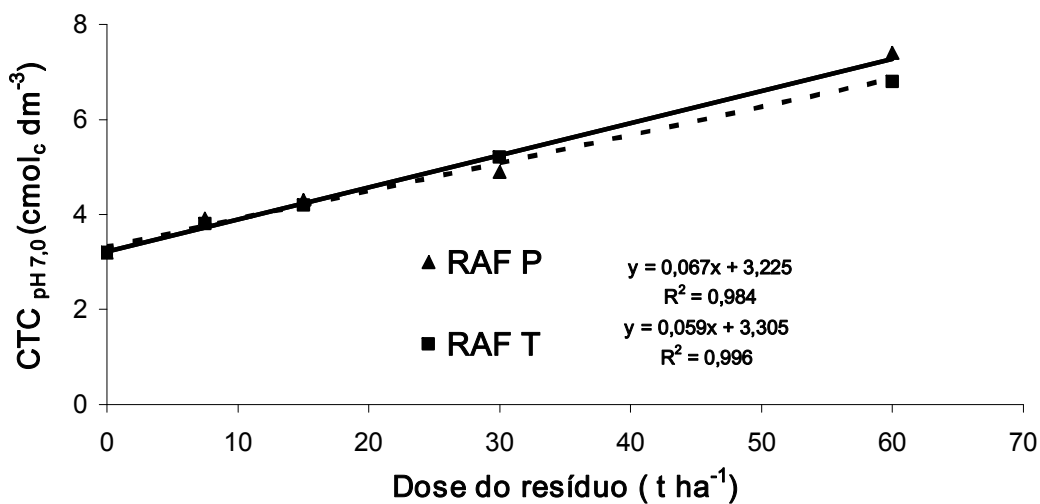


Figura 13. Aumento da CTC_{pH 7,0} em função da adição de doses crescentes de RAF's no solo PVA_d (média de quatro repetições).

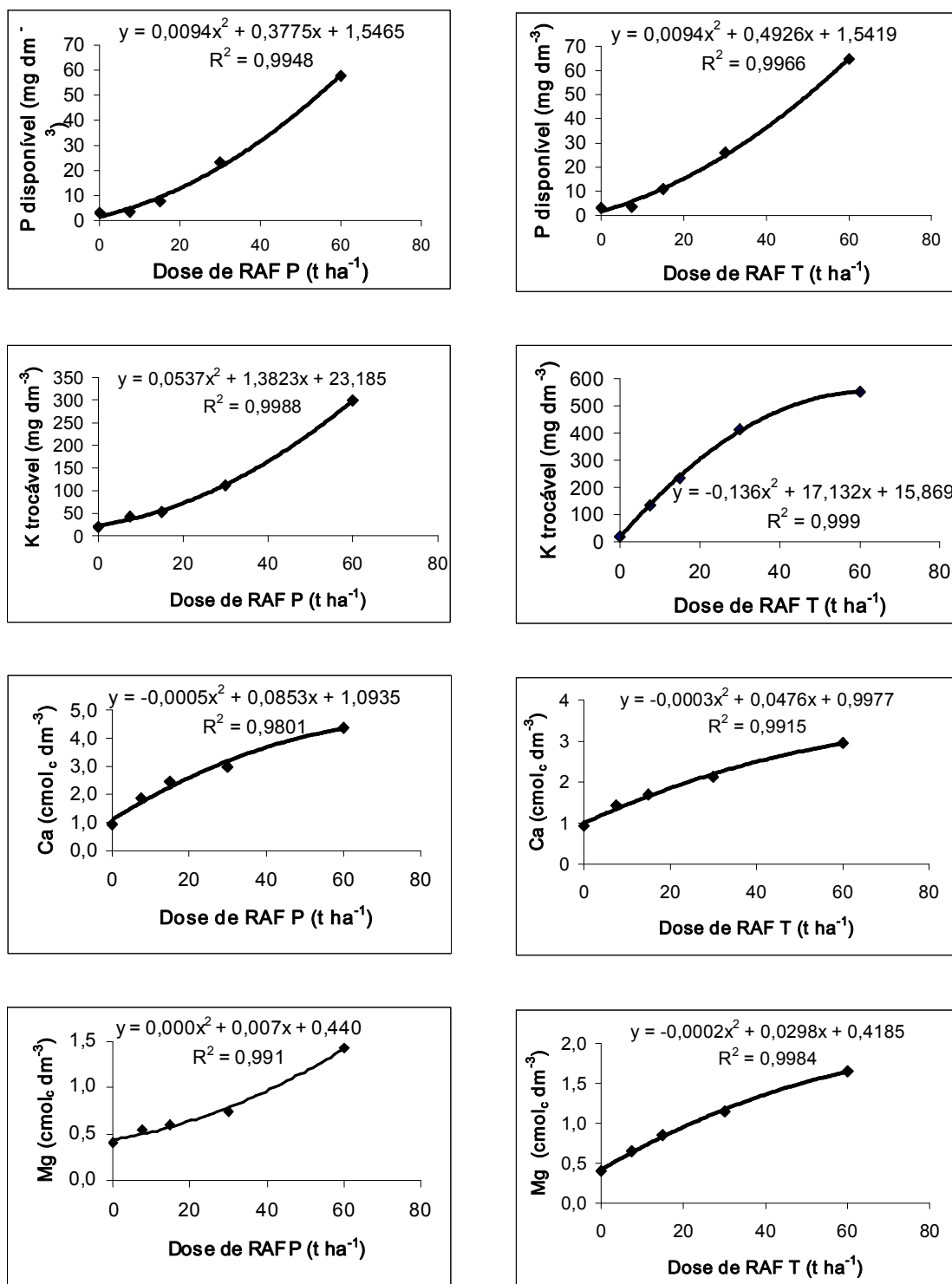


Figura 14. Curvas de aumento dos teores de P disponível e de K, Ca e Mg trocáveis no solo, com adição de doses crescentes de resíduos de agroindústria fumageira (RAF's).

4.2.1.3 Absorção de macronutrientes pelas plantas e caracterização da água de lixiviação

Neste ítem serão apresentados e discutidos os teores de macronutrientes na parte aérea das plantas, as quantidades absorvidas pelas plantas e a retirada por lixiviação. A soma destas duas frações foi considerada como a retirada total do sistema solo-planta. Os teores de macronutrientes no tecido (%) e na água de lixiviação (mg L^{-1}) são dados nos Apêndices 2 e 4, respectivamente.

4.2.1.3.1 Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado

As quantidades de N absorvido e acumulado na parte aérea das plantas de milho são apresentadas na Tabela 7. Pode-se observar que a absorção deste nutriente nos tratamentos com adição de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ dos resíduos foi de, aproximadamente, 50% da determinada no tratamento com adição de adubo mineral, não sendo observada diferença entre resíduos. Entretanto, a absorção de nitrogênio aumentou no tratamento com adição de 15 t ha^{-1} dos resíduos. Nas doses maiores (30 e 60 t ha^{-1}), não foi determinado aumento das quantidades de N absorvido pelas plantas ou aumento no rendimento de MS. Nos tratamentos com adição das doses de 15 a 60 t ha^{-1} , foi observada a tendência de maior absorção de N com a aplicação do RAF P em relação ao RAF T. Este fato pode ser devido à maior nitrificação deste resíduo, conforme foi observado no estudo de biodegradação (item 4.1.4).

A maior absorção de N foi obtida no tratamento sem adição de potássio na forma mineral; o potássio adicionado pelo resíduo (15 t ha^{-1} de RAF P) foi suficiente para o crescimento normal das plantas; nas doses maiores de resíduo (principalmente com o RAF T) pode ter ocorrido a inibição da absorção de N amoniacal (N-NH_4^+) pelo íon K^+ , em alta concentração no solo.

A lixiviação de N foi baixa nos tratamentos com adubação mineral ou com adição de até 30 t ha^{-1} dos resíduos (Tabela 7). Nestes casos, o N foi lixiviado preferencialmente na forma de nitrato.

Tabela 7. Nitrogênio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado durante o cultivo do milho (média de quatro repetições)

Tratamento	N absorvido	N lixiviado		Total
		NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻	
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Testemunha	170 i	0,7 b	61,2 cdefg	232 j
NPK	1198 bcd	2,4 b	70,8 cde	1271 cde
RAF P 7,5	637 gh	1,5 b	79,2 bc	717 hi
RAF T 7,5	619 h	0,9 b	42,3 defg	662 i
RAF P 15	1110 bcde	5,6 b	65,9 cdef	1181 cdef
RAF T 15	998 def	7,8 b	93,7 abc	1099 defg
RAF P 30	1214 bcd	6,5 b	75,2 bcd	1295 defg
RAF T 30	861 efgh	30,6 b	126,8 a	1018 cd
RAF P 60	1030 cdef	8,0 b	39,3 efg	1078 efg
RAF T 60	900 efg	655,1 a	33,1 fg	1589 defg
RAF P 15 + NP	1601 a	2,9 b	73,6 bcd	1677 ab
RAF P 15 + NK	1346 ab	11,7 b	68,6 cde	1427 abc
RAF P 15 + PK	1066 cdef	4,0 b	83,7 bc	1154 cdefg
RAF T 15 + NP	1287 bc	2,4 b	91,7 abc	1381 bc
RAF T 15 + NK	824 fgh	9,5 b	104,1 ab	938 fgh
RAF T 15 + PK	521 fgh	2,9 b	72,8 bcd	897 ghi
CDA 15	650 gh	1,4 b	30,3 g	682 hi
VC 20	295 i	0,5 b	32,4 g	327 j

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No tratamento com a adição de 60 t ha⁻¹ de RAF T houve grande lixiviação de N na forma amoniacal. A perda de N-NH₄⁺ na água de lixiviação pode ter ocorrido pela baixa capacidade de retenção de cátions (CTC) e ao baixo teor de argila (< 15%) do solo PVAd. Segatto (2001), trabalhando com a adição de diferentes resíduos industriais num solo de mesma classe textural, também atribuiu a presença de N-NH₄⁺ na água de lixiviação à textura arenosa e à baixa CTC do solo. Além disso, a grande concentração de potássio na solução do solo pode ter promovido o deslocamento dos íons NH₄⁺ dos sítios de troca de cátions. Nestes tratamentos também foi coletado maior volume de água de lixiviação no perfil do solo (Apêndice 4).

A granulometria particulada do resíduo RAF T provavelmente contribuiu para o aumento da permeabilidade do solo. Conforme Kiehl (1984), a adição de resíduos orgânicos pode diminuir a densidade e aumentar a condutividade hidráulica do solo.

Conforme a CQFS/NRS (2004), o limite inferior da faixa de suficiência de nitrogênio na folha indicadora do milho (primeira folha abaixo e oposta à espiga, coletada na fase de pendramento) é de 2,7 %. Os teores determinados na parte aérea da planta inteira, por ocasião do corte do experimento, foram menores que este valor (Apêndice 2). Este fato pode ser devido à diluição provocada por tecidos em que o teor é menor, como em talos e folhas em senescência. Conforme Marschner (1986), a senescência dos tecidos foliares induz a modificação da composição química dos solutos e a permeabilidade da cutícula das plantas, possibilitando a perda de macronutrientes como N e K por lixiviação foliar.

Considerando-se uma taxa de degradação de, aproximadamente, 45% para os RAF's aplicados na dose de 15 t ha^{-1} (item 4.1.2), poderiam ter sido liberados aproximadamente $130 \text{ kg de N ha}^{-1}$, ou aproximadamente 72% da dose recomendada na adubação mineral. Este fato indica que os resíduos podem suprir boa parte do nitrogênio necessário para a cultura, sem risco de poluição de águas subterrâneas por lixiviação de nitrato, aplicando-se doses adequadas dos mesmos ($< 20 \text{ t ha}^{-1}$).

4.2.1.3.2 Fósforo na parte aérea das plantas

Na Tabela 8 são dadas as quantidades de fósforo na parte aérea das plantas. Não foi determinado o fósforo lixiviado, devido aos teores muito baixos desse elemento nos resíduos de agroindústria fumageira (0,29 %). Além disso, a deficiência de fósforo foi o principal sintoma apresentado pelas plantas de milho nas primeiras semanas de cultivo, sobretudo nos tratamentos com as doses mais altas de RAF's. Segatto (2001), trabalhando com a adição de doses de até 445 kg ha^{-1} de P_2O_5 (resíduo de laticínio + adubação mineral) em solo com teor de argila $< 15\%$, determinou teores muito baixos de fósforo no

lixiviado (da ordem de partes por bilhão), demonstrando que o fósforo adicionado nos tratamentos ficou retido no solo ou foi absorvido pelas plantas.

Foram determinadas absorções de fósforo pelas plantas variando de 12,4 mg até 198,0 mg vaso⁻¹. Pôde ser observado que o tratamento com adição de CDA apresentou a maior extração de P do solo e o maior rendimento de MS (Figura 7).

Os teores de P no tecido das plantas nos tratamentos com adição de até 15 t ha⁻¹ de RAF's foram menores que 0,2 %, teor considerado como limite inferior da faixa de suficiência pela CQFS/NRS (2004), considerando-se a folha indicadora (oposta e abaixo da espiga). Isso pode ter comprometido o rendimento de MS nesses tratamentos. O baixo teor verificado no tecido do tratamento com adubação mineral e os baixos teores residuais no solo (Tabela 3) podem indicar que a dose recomendada pela Comissão... (1994) seja muito baixa (80 kg ha⁻¹ de P₂O₅) para o nível de rendimento esperado.

Por outro lado, embora os teores de fósforo nos tratamentos com adição de resíduos em quantidades maiores que 15 t ha⁻¹ tenham sido maiores que 0,2 %, verificou-se um decréscimo no rendimento de MS. Este fato indica que outros atributos do solo e/ou indicadores de reação do solo, citados anteriormente, podem ter prejudicado o rendimento de MS das plantas.

4.2.1.3.3 Potássio na parte aérea das plantas e lixiviado

Foi observada grande variação nas quantidades de potássio absorvido pelas plantas e lixiviado do solo (Tabela 8). O K absorvido pelas plantas variou de 245,9 até 3075,0 mg vaso⁻¹, enquanto que o K lixiviado variou de 3,5 até 2827,6 mg vaso⁻¹.

Esta variação pode ser atribuída à grande quantidade de potássio adicionada ao solo, principalmente pelo RAF T. Foram adicionadas quantidades aproximadamente 5, 10, 20 e 40 vezes maiores que a dose de potássio recomendada pela Comissão... (1994) nos tratamentos com 7,5, 15, 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF T, respectivamente. Por outro lado, à exceção dos tratamentos com 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF T, não foram determinadas diferenças significativas de K lixiviado entre os tratamentos.

Tabela 8. Fósforo e potássio total na parte aérea das plantas (MS) e potássio lixiviado (média de quatro repetições)

Tratamento	mg vaso ⁻¹			
	P absorvido	K absorvido	K lixiviado	K total
Testemunha	12 h	246 h	7 c	253 i
NPK	85 defg	960 g	8 c	967 h
RAF P 7,5	69 fg	1645 f	7 c	1652 g
RAF T 7,5	54 g	2202 def	8 c	2210 defg
RAF P 15	117 bcd	2918 ab	12 c	2931 bc
RAF T 15	92 def	3063 a	18 c	3081 b
RAF P 30	132 bc	3075 a	20 c	3095 b
RAF T 30	74 fg	2462 abcd	332 b	2793 bcde
RAF P 60	75 efg	2112 cdef	13 c	2225 defg
RAF T 60	68 fg	2192 def	2828 a	5020 a
RAF P 15 + NP	144 b	2384 bcde	11 c	2395 cdef
RAF P 15 + NK	104 cdef	2407 bcde	31 c	2438 bcdef
RAF P 15 + PK	137 bc	2466 abcd	17 c	2482 bcdef
RAF T 15 + NP	129 bc	2842 abc	22 c	2864 bcdef
RAF T 15 + NK	82 defg	1797 ef	121 c	1918 efg
RAF T 15 + PK	110 bcde	2671 abcd	20 c	2691 bcde
CDA 15	198 a	2135 def	9 c	2145 efg
VC 20	82 defg	428 gh	4 c	431 hi

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores de K nos tecidos das plantas dos tratamentos com RAF P e RAF T variaram de 4,1 até 6,7 %, considerados acima da faixa de suficiência para a cultura do milho (CQFS/NRS, 2004); a exceção foi o tratamento com 7,5 t ha⁻¹ de RAF P que apresentou teor de 2,9 % (Apêndice 2). Os teores indicam que ocorreu maior absorção de potássio do que a necessária para desenvolvimento das plantas, processo conhecido como “consumo de luxo” de nutrientes (Marschner, 1986).

Em geral, à exceção do tratamento com 60 t ha⁻¹ de RAF T, a saída de K do sistema solo por lixiviação foi menor que a extração pelas plantas.

4.2.1.3.4 Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado

Na Tabela 9 são dadas as quantidades de cálcio na parte aérea das plantas de milho (MS) e as lixiviadas. As quantidades de cálcio absorvido variaram de 51,3 até 290,2 mg vaso⁻¹. Foi verificado que as plantas dos tratamentos com RAF P (15 e 30 t ha⁻¹) extraíram significativamente mais cálcio do solo em relação ao RAF T. Este fato pode ser explicado pela sua maior disponibilidade de cálcio nos resíduos RAF P. À exceção do tratamento com 30 t ha⁻¹ de RAF T e com adição de CDA, os teores de cálcio no tecido (> 0,20 %) foram considerados suficientes para desenvolvimento das plantas pela CQFS (2004) (Apêndice 2).

Tabela 9. Cálcio na parte aérea (MS) das plantas de milho e lixiviado do solo (média de quatro repetições)

Tratamento	Ca absorvido	Ca lixiviado	Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	51 g	38 ef	89 f
NPK	231 ab	54 ef	285 bc
RAF P 7,5	143 cde	44 ef	187 de
RAF T 7,5	115 defg	42 ef	156 def
RAF P 15	198 bc	81 bcde	279 bc
RAF T 15	108 defg	77 cde	184 de
RAF P 30	145 cde	78 cde	223 cde
RAF T 30	57 fg	134 b	191 de
RAF P 60	96 defg	65 def	161 def
RAF T 60	78 efg	322 a	400 a
RAF P 15 + NP	279 a	78 cde	357 ab
RAF P 15 + NK	223 ab	123 bc	346 ab
RAF P 15 + PK	290 a	84 bcde	375 a
RAF T 15 + NP	199 bc	81 bcde	280 bc
RAF T 15 + NK	97 defg	118 bcd	215 cde
RAF T 15 + PK	124 cdefg	63 ef	186 de
CDA 15	169 bcd	68 def	237 cd
VC 20	126 cde	21 f	147 ef

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Foi determinada absorção significativamente maior de cálcio pelas plantas nos tratamentos com adição de nitrogênio e fósforo na forma mineral e de ambos os resíduos (RAF P e RAF T) na dose intermediária (15 t ha^{-1}) em relação à mesma dose sem adição dos nutrientes minerais (Tabela 9).

A quantidade de cálcio lixiviado nos vasos variou de 20,7 até 322,2 mg vaso^{-1} . Os tratamentos com adições de 30 e 60 t ha^{-1} de RAF T apresentaram lixiviação de cálcio significativamente maior no perfil do solo, provavelmente devido à grande quantidade de potássio adicionado com os resíduos. Esses tratamentos apresentaram, também, maior quantidade de cálcio lixiviado em relação ao absorvido pelas plantas (Tabela 9). Possivelmente o excesso de cátions K^+ promoveu, por efeito de massa, o deslocamento de cálcio dos sítios de troca para a solução do solo.

De maneira geral, foi determinada maior quantidade de cálcio absorvido pelas plantas do que a lixiviada no perfil do solo.

4.2.1.3.5 Magnésio na parte aérea das plantas e lixiviado

As quantidades de magnésio na parte aérea das plantas (MS) variaram de 66,7 a 306,3 mg vaso^{-1} , sendo, em geral, maiores nos tratamentos com adição do RAF P (Tabela 10). Este fato pode ser atribuído à inibição competitiva da absorção do íon Mg^{2+} pelo íon K^+ , adicionado em grande quantidade nos tratamentos com adição de doses crescentes do RAF T. A tendência de teores maiores de Mg nas amostras de tecido dos tratamentos com RAF P reforça esta hipótese. Entretanto, os teores de magnésio no tecido foram considerados normais para a cultura do milho (Apêndice 2).

Conforme Usherwood (1982), grandes quantidades de adubo potássico somente são prejudiciais, do ponto de vista do desbalanço nutricional das plantas, quando o solo é naturalmente muito deficiente em cálcio e magnésio.

À semelhança do que foi observado para o cálcio (Tabela 9), a adição de nitrogênio e de fósforo mineral nos tratamentos com 15 t ha^{-1} de RAF's aumentou a extração de magnésio pelas plantas. No Apêndice 2 pode-se observar que foram determinados maiores teores de magnésio do que de

cálcio nos tecidos. Conforme Adams (1984), o magnésio possui raio de hidratação maior que o do cálcio e pode ter sido deslocado dos sítios de troca pelas bases (Ca^{2+} e K^+) adicionadas com os RAF's, aumentando a concentração do nutriente na solução do solo e conseqüentemente a absorção pelas plantas.

Tabela 10. Magnésio na parte aérea (MS) das plantas de milho e lixiviado do solo (média de quatro repetições)

Tratamento	Mg absorvido	Mg lixiviado	Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	67 i	7 fg	74 j
NPK	340 a	13 efg	353 a
RAF P 7,5	194 def	10 efg	204 defgh
RAF T 7,5	162 defgh	9 efg	171 fghi
RAF P 15	240 bcd	21 cdef	261 bcd
RAF T 15	131 fghi	18 cdefg	149 ghij
RAF P 30	194 def	18 cdefg	212 defgh
RAF T 30	89 hi	32 bc	121 ij
RAF P 60	122 fghi	14 efg	136 hij
RAF T 60	104 ghi	116 a	219 defg
RAF P 15 + NP	306 ab	21 cdef	327 ab
RAF P 15 + NK	218 cde	36 b	254 bcde
RAF P 15 + PK	290 abc	24 bcde	314 abc
RAF T 15 + NP	222 cde	20 cdef	242 cdef
RAF T 15 + NK	108 ghi	31 bcd	138 ghij
RAF T 15 + PK	151 efg	16 defg	167 fghi
CDA 15	198 def	18 cdefg	216 defgh
VC 20	171 defg	5 g	176 efghi

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em geral, à semelhança do que foi observado para os macronutrientes nitrogênio, potássio e cálcio, a quantidade de magnésio extraída pelas plantas (MS) na parte aérea foi maior que a lixiviada no perfil do solo durante o cultivo do milho.

4.2.1.3.6 Teor de sódio, pH e condutividade elétrica do lixiviado

Na Tabela 11 são dados os valores de sódio (Na), pH e condutividade elétrica determinados na água de lixiviação do solo. Os teores de sódio lixiviado variaram de 18,7 a 184,8 mg vaso⁻¹.

O tratamento com 15 t ha⁻¹ de cama-de-aviário (CDA) foi o único que apresentou problemas com a saturação de sódio na solução do solo. Foram verificados sintomas de “seca fisiológica” nas plantas de milho, tendo sido feita uma lixiviação forçada para diminuir a concentração salina do solo. Apesar da grande quantidade de sódio determinada nos tratamentos com 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF T, a elevação excessiva do pH do solo, a imobilização temporária de nutrientes e a saturação de K⁺ parecem ter sido os principais limitantes do crescimento das plantas.

Os valores de pH não apresentaram variação significativa entre a testemunha de solo e os tratamentos com RAF's. Os valores mais alto e mais baixo de pH foram determinados nos tratamentos com cama-de-aviário e vermicomposto, respectivamente. Os valores de pH do lixiviado foram, em média, muito próximos da neutralidade.

Os valores de condutividade elétrica (CE) variaram de 507,8 a 5802,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$ nas amostras de água lixiviada no perfil do solo. Apesar da concentração salina (avaliada pela CE) do tratamento com CDA ter sido semelhante à maioria dos tratamentos com RAF's, o teor de sódio, em relação aos outros cátions básicos, provavelmente provocou a manifestação dos sintomas de “seca fisiológica” nas plantas.

O alto valor de condutividade elétrica determinado no tratamento com a adição de 60 t ha⁻¹ do RAF T (Tabela 11) foi atribuído às altas concentrações de NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺ determinadas na água de lixiviação (Apêndice 4).

Tabela 11. Sódio lixiviado e pH e condutividade elétrica (CE) determinados na água de lixiviação coletada durante o cultivo do milho (média de quatro repetições)

Tratamento	Na	pH	Condutividade Elétrica (CE)
	--- mg vaso ⁻¹ ---		--- μS cm ⁻¹ ---
Testemunha	29 fg	7,6 abc	508 fg
NPK	42 cdefg	7,4 cd	894 def
RAF P 7,5	36 efg	7,6 abc	887 def
RAF T 7,5	33 efg	7,6 abc	675 efg
RAF P 15	56 bcdef	7,5 abc	1106 bcd
RAF T 15	59 bcde	7,6 abc	955 cde
RAF P 30	47 bcdef	7,7 abc	1055 cde
RAF T 30	74 b	7,8 ab	1485 b
RAF P 60	40 defg	7,7 abc	936 de
RAF T 60	185 a	7,4 bcd	5803 a
RAF P 15 + NP	57 bcde	7,5 bc	996 cde
RAF P 15 + NK	71 b	7,4 bcd	1355 bc
RAF P 15 + PK	65 bcd	7,5 bc	1080 bcde
RAF T 15 + NP	70 bc	7,6 abc	829 defg
RAF T 15 + NK	73 b	7,6 abc	1205 bcd
RAF T 15 + PK	54 bcdef	7,5 bc	844 defg
CDA 15	175 a	7,1 e	1100 bcd
VC 20	19 g	7,9 a	458 g

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05).

4.2.2 Efeito residual e da reaplicação dos RAF's no sistema solo-planta-água

Neste ítem serão apresentados e discutidos os efeitos residual e da reaplicação (de 33,3% da dose original) dos resíduos RAF P e RAF T (RAF's) no sistema solo-planta-água utilizando-se a cultura do sorgo como planta teste. Convém salientar que devido à perda de amostras de matéria seca (MS), o tratamento com cama-de-aviário (CDA) foi descartado na discussão dos resultados dos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos. No tratamento com adubação mineral NPK não foram reservadas repetições para o estudo do efeito residual.

4.2.2.1 Efeito residual e da reaplicação dos resíduos no crescimento das plantas

O rendimento de matéria seca (MS) da parte aérea de sorgo obtido no estudo do efeito residual da adição de RAF's variou de 4,6 até 36,5 g vaso⁻¹ (Tabela 12). Os tratamentos com adição de até 15 t ha⁻¹ de RAF T e RAF P apresentaram rendimentos de MS de sorgo até 700% maiores que o determinado no tratamento testemunha de solo. Entretanto, não foram determinadas diferenças estatísticas entre os dois tipos de resíduos aplicados nesta quantidade.

Os tratamentos com adição de 30 e de 60 t ha⁻¹ do RAF P e de ambos os resíduos na dose intermediária (15 t ha⁻¹) acrescidos de nitrogênio e fósforo na forma mineral apresentaram rendimentos semelhantes ao obtido com a adubação mineral recomendada para o sorgo pela Comissão...(1995). Pode-se verificar que os outros tratamentos com a dose 15 t ha⁻¹ de resíduos mais nutrientes minerais (NK e PK) apresentaram acúmulos de MS semelhantes aos determinados nos tratamentos com somente os RAF's na mesma dose; neste caso, a limitação do rendimento observada nos tratamentos sob efeito residual foi relacionada com a deficiência combinada de nitrogênio e de fósforo. Nos tratamentos com adição de 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF

T, o nitrogênio pode ter sido o fator limitante do rendimento, uma vez que os teores de P e de K do solo foram considerados “alto” e “muito alto”, respectivamente (CQFS/NRS, 2004).

Foram verificados rendimentos significativamente superiores de MS nos tratamentos com adição de 30 e 60 t ha⁻¹ do RAF P em relação à mesma dose do RAF T; os rendimentos foram semelhantes estatisticamente nos tratamentos com as menores adições dos RAF's. Devido à saturação de potássio na solução do solo nos tratamentos com maior adição do RAF T, é possível que tenha ocorrido a inibição da absorção de nitrogênio na forma amoniacal (NH₄⁺), prejudicando o crescimento e o acúmulo de MS pelas plantas. O rendimento de MS de sorgo variou de 8,0 a 43,7 g vaso⁻¹ com reaplicação de 33,3% da dose inicial dos resíduos (Tabela 12). Em geral, o rendimento de MS aumentou nos tratamentos com reaplicação dos resíduos (em média 47,5 %) em relação ao observado com o efeito residual, à exceção do tratamento T 15 + NK.

Foram determinados incrementos significativos no rendimento de MS em relação à testemunha em todos os tratamentos com adição de RAF's. O rendimento de MS foi muito baixo no tratamento testemunha no segundo cultivo (1,5 g vaso⁻¹), evidenciando a baixa fertilidade natural e o rápido esgotamento de nutrientes do solo PVAd.

Obteve-se maior resposta à reaplicação das doses de até 15 t ha⁻¹ dos RAF's em relação ao estudo do efeito residual. O incremento de MS em relação ao estudo do efeito residual variou de 67,7 até 120,2 % nestes tratamentos(Tabela 12). O rendimento de MS aumentou nos tratamentos com as doses de 30 e de 60 t ha⁻¹ de RAF P (reaplicação) em relação às mesmas doses de RAF T. Embora estas doses de RAF P tenham proporcionado os maiores rendimentos de MS, não foi observada diferença de MS entre os tratamentos P 30 e P 60 (Tabela 12).

O efeito da adição de nitrogênio mais fósforo (NP) foi significativo nos tratamentos com a dose de 15 t ha⁻¹ dos resíduos RAF P e RAF T. O rendimento aumentou em relação aos demais tratamentos com adição de resíduos mais nutrientes minerais (NK e PK), comprovando a interação positiva entre os dois nutrientes (NP) na forma mineral, tanto nos tratamentos com a reaplicação como naqueles de efeito residual dos RAF's (Tabela 12). Por outro

lado, à semelhança do que foi observado no primeiro cultivo, a adição de N mais K (NK) na forma mineral reduziu o rendimento de MS nos tratamentos com reaplicação de RAF T.

Tabela 12. Rendimento de MS do sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos de agroindústria fumageira

Tratamento	Rendimento de MS		Acréscimo da reaplicação
	Residual	Reaplicação	
	----- g vaso ⁻¹ -----		%
Testemunha	1,5 e	-----	-----
NPK + calcário	-----	34,5 cd	-----
RAF P 7,5	4,6 e	8,0 jl	73,4
RAF T 7,5	9,2 de	15,4 hij	67,7
RAF P 15	11,0 cde	24,3 efg	120,2
RAF T 15	11,9 cde	23,1 fgh	94,5
RAF P 30	31,2 ab	43,7 ab	39,9
RAF T 30	20,0 bcd	21,2 fgh	5,7
RAF P 60	36,5 a	42,5 ab	16,6
RAF T 60	22,6 bc	32,0 cde	41,7
RAF P 15 + NP	30,6 ab	48,1 a	57,0
RAF P 15 + NK	21,4 bc	25,6 ef	19,4
RAF P 15 + PK	16,9 cd	25,8 ef	52,6
RAF T 15 + NP	34,3 a	36,2 bc	5,5
RAF T 15 + NK	20,7 bcd	16,5 ghi	-20,1
RAF T 15 + PK	19,7 bcd	27,4 def	39,0
VC 20	4,9 e	9,8 ij	99,4
Média			47,5

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

4.2.2.1.1 Índice de eficiência agrônômica (IEA)- Efeito residual e da reaplicação dos resíduos

Na Tabela 13 são apresentados os dados os índices de eficiência agrônômica (IEA's) obtidos nos estudos do efeito residual e de reaplicação de 33,3% da dose inicial dos resíduos.

No estudo do efeito residual, os IEA's variaram de 9,5 até 106,0% do rendimento proporcionado pela adição dos nutrientes minerais (NPK + calcário) na dose recomendada pela COMISSÃO... (1995) para a cultura do sorgo. Os IEA's determinados nos tratamentos com até 15 t ha⁻¹ dos resíduos foram considerados baixos (< 40%). Foi verificado que os IEA's determinados para o efeito residual do RAF P foram maiores que os determinados para o RAF T, à exceção da dose de 7,5 t ha⁻¹.

Tabela 13. Índice de eficiência agrônômica (IEA) dos tratamentos em relação ao tratamento com nutrientes minerais (NPK) (média de duas repetições)

Tratamento	Índice de Eficiência Agrônômica (IEA)		
	Residual	Reaplicação	Acréscimo na reaplicação
	----- % -----		
NPK	100,0	100,0	-----
RAF P 7,5	9,5	19,8	108,4
RAF T 7,5	23,3	42,2	80,9
RAF P 15	28,9	69,1	139,0
RAF T 15	31,4	65,4	108,1
RAF P 30	90,2	128,0	41,9
RAF T 30	56,2	59,7	6,2
RAF P 60	106,0	124,4	17,3
RAF T 60	64,0	92,6	44,6
RAF P 15 + NP	88,3	141,2	60,0
RAF P 15 + NK	60,5	73,1	20,9
RAF P 15 + PK	46,7	73,7	57,8
RAF T 15 + NP	99,6	105,3	5,8
RAF T 15 + NK	58,3	45,6	-21,7
RAF T 15 + PK	55,3	78,6	42,2
VC 20	10,3	25,1	143,1
Média			57,0

Foi observado que apenas os tratamentos P 30, P 60, P15 + NP e T 15 + NP poderiam ser considerados no nível de suficiência (IEA > 85%). De

outra forma, foi verificado que nenhum tratamento conseguiu atingir valores de IEA acima de 65% somente com o efeito residual do RAF T.

Também pode ser verificado que a adição de nutrientes minerais à dose intermediária de resíduos no estudo do efeito residual promoveu grande aumento nos IEA's. Fica evidenciado desta forma, a depleção de nutrientes no solo PVAd e o pequeno efeito residual das doses menores que 15 t ha^{-1} de ambos os RAF's.

O IEA variou de 19,8 até 141,8% no estudo dos efeitos da reaplicação dos resíduos RAF P e RAF T ao solo. De maneira geral, foram observados acréscimos nos valores de IEA, em média 57% de aumento com a reaplicação dos resíduos, à exceção do tratamento T 15 + NK, que teve redução.

Embora tenham sido observados aumentos nos valores dos IEA's, o nível de suficiência também só foi atingido no tratamento T 60, além daqueles mencionados anteriormente no estudo do efeito residual. Os maiores incrementos do IEA foram obtidos com a reaplicação das menores doses de resíduos e no tratamento com adição do VC (Tabela 13). Este fato foi atribuído à menor disponibilidade residual de nutrientes nestes tratamentos.

4.2.2.1.2 Curvas de resposta das plantas- Efeito residual e da reaplicação dos resíduos

Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as curvas de resposta das plantas nos estudos com o efeito residual e da reaplicação dos resíduos, respectivamente. A resposta de rendimento de MS variou com a dose e com o tipo de RAF adicionado ao solo.

Houve deslocamento do nível crítico e da faixa de máximo rendimento de MS do intervalo entre 15 e 20 t ha^{-1} , determinado no cultivo do milho, para doses superiores a 50 t ha^{-1} no segundo cultivo. A Máxima Eficiência Técnica (MET) para o RAF P e RAF T foi calculada em 53,1 e 63,6 t ha^{-1} , respectivamente (Figura 15). Desta forma, para obter o máximo rendimento de MS de sorgo com o efeito residual, seria necessário praticamente triplicar a dose ótima obtida para o cultivo do milho. Este fato

pode ser justificado pela baixa CTC do solo, pelas quantidades de nutrientes lixiviadas do solo (item 4.2.1.3) e pelos menores teores de nutrientes determinados no solo após o cultivo do sorgo (item 4.2.1.2).

O efeito fertilizante residual apresentou diferenças significativas no acúmulo de MS entre os resíduos RAF P e RAF T a partir da adição da dose de 30 t ha⁻¹. Por outro lado, diferentemente do primeiro cultivo, não foi verificado redução no rendimento de MS nas doses mais altas de resíduos. Este fato pode ser atribuído à grande lixiviação de potássio observada nestes tratamentos (Ver Tabela 18). Pode-se verificar na Figura 15 que as regressões apresentaram bons coeficientes de determinação, $R^2 = 0,95$ e $0,99$, para o RAF P e para o RAF T, respectivamente.

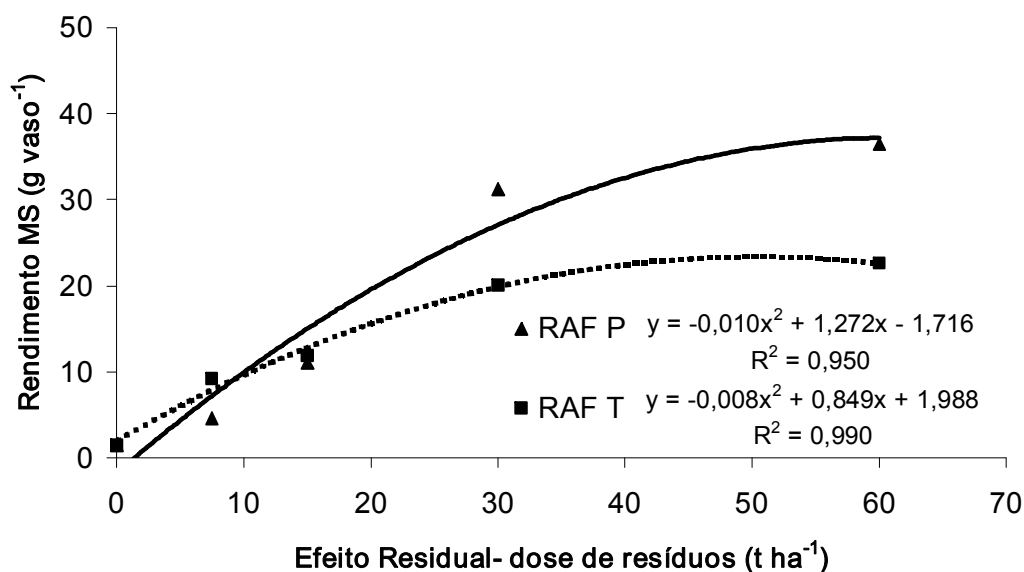


Figura 15. Curva de resposta residual para o RAF P (pó) e para o RAF T (talos) no cultivo de sorgo

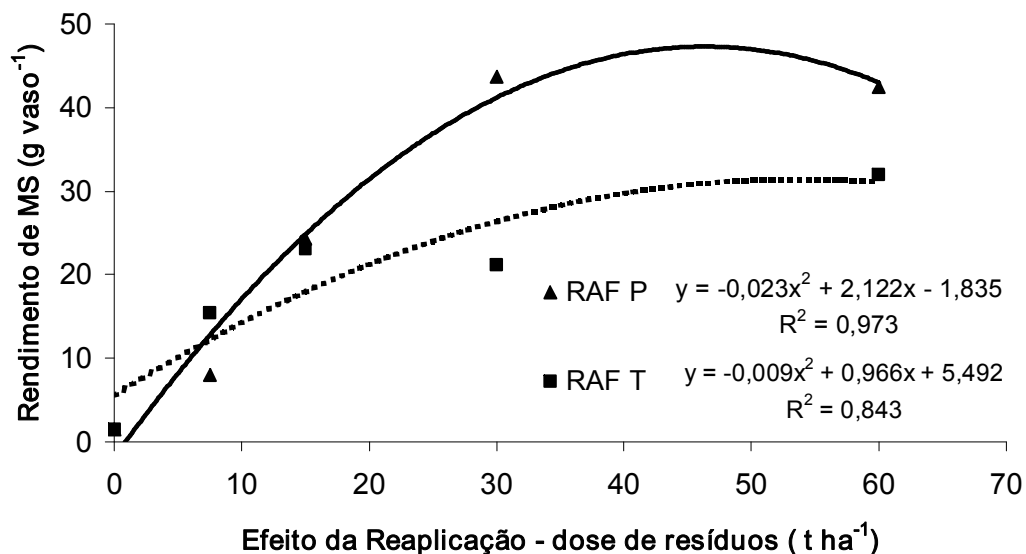


Figura 16. Curva de resposta da reaplicação (33,3% da dose inicial) do RAF P (pó) e do RAF T (talos) no cultivo de sorgo

Observa-se na Figura 16 que também houve deslocamento da faixa ótima de adição dos resíduos ao solo nos tratamentos com reaplicação dos RAF's, à semelhança do que foi observado para o efeito residual. A dose de Máxima Eficiência Técnica (MET) foi calculada em 46,1 e 53,7 t ha⁻¹ de RAF P e de RAF T, respectivamente.

4.2.2.2 Efeito residual e de reaplicação dos resíduos no solo

O efeito residual e a reaplicação de doses crescentes dos resíduos de agroindústria fumageira (RAF P e RAF T) modificaram os teores de nutrientes e outros atributos do solo. A seguir serão abordados e discutidos os principais indicadores de química e de fertilidade do solo avaliados após o segundo cultivo (sorgo).

4.2.2.2.1 Teores de matéria orgânica e indicadores da reação do solo

Os teores de matéria orgânica do solo (MOS) determinados ao final do estudo do efeito residual variou de 15,0 até 30,0 g dm⁻³ (Tabela 14). Em geral não foram observadas variações significativas nos teores MOS em relação aos determinados após o primeiro cultivo. Entretanto, foi verificado que permaneceu a tendência de maiores teores de MOS com o aumento das doses de resíduos. Os tratamentos com as adições de 30 e de 60 t ha⁻¹ dos resíduos permaneceram com teores residuais de MOS significativamente maiores que o determinado no tratamento testemunha (Tabela 14).

Os teores de MOS variaram de 15,5 até 28,0 g dm⁻³ no estudo com a reaplicação dos resíduos. Somente os tratamentos com as adições de 30 e de 60 t ha⁻¹ dos resíduos apresentaram teores de MOS significativamente maiores que o determinado no tratamento testemunha, à semelhança do verificado para o efeito residual.

A CTC_{pH 7,0} e a saturação de bases (V%) aumentaram conforme o aumento da dose de resíduos adicionada ao solo, tanto nos tratamentos com o efeito residual como naqueles com a reaplicação dos RAF's (Tabela 14).

Os valores de pH apresentaram a mesma tendência observada para a saturação de bases (V%), indicando a alta correlação existente entre esses indicadores da reação do solo (Tedesco & Bissani, 2004; Quaggio, 2000; Raij, 1991).

Os valores de acidez potencial (H + Al) diminuíram com o aumento da adição dos resíduos. Este fato era esperado, uma vez que o aumento do pH e da saturação de bases resulta em menor atividade dos íons H⁺ e Al³⁺ na solução do solo (Tedesco & Bissani, 2004).

Foi verificado que o pH em água, a saturação por bases (V%) e a acidez potencial (H+Al) apresentaram variação pouco significativa entre os tratamentos com as mesmas doses, tanto para o efeito residual como para a reaplicação dos resíduos ao solo (Tabela 14).

A CTC_{pH 7,0}, nas doses maiores que 30 t ha⁻¹, foi o atributo que apresentou maior variação entre o efeito residual e o da reaplicação;

provavelmente em função da adição de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) ao solo.

Observou-se que os efeitos da adição dos resíduos sobre os indicadores da reação do solo PVAd foram semelhantes após o primeiro e o segundo cultivos. Não foi detectada a presença de alumínio no solo. Este fato é devido aos valores médios de pH determinados no solo iguais ou maiores que 5,5, inclusive na testemunha. Conforme Volkweiss (1989), os teores de alumínio trocável em solos com pH maior que este valor são muito pequenos ($< 0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Tabela 14. Teores de MO e de CTC e indicadores da reação do solo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos após o segundo cultivo (sorgo)

Tratamento	Efeito Residual					Efeito da Reaplicação				
	MO	V	pH água	H + Al	CTC _{pH 7,0}	MO	V	pH água	H + Al	CTC _{pH 7,0}
	-- g dm ⁻³ --	--- % ---		----- cmol _c dm ⁻³ -----		-- g dm ⁻³ --	--- % ---		----- cmol _c dm ⁻³ -----	
Testemunha	14,3 f	40,3 l	5,5 h	1,7 a	3,0 g	14,3 f	40,3 l	5,5 h	1,7 ab	3,0 e
NPK	16,5 cdef	63,8 ghij	5,9 fg	1,5 abc	4,1 cdef	16,5 cdef	63,8 ghi	5,9 gh	1,5 bc	4,1 cde
P 7,5	17,5 bcdef	65,5 fghij	6,3 ef	1,3 abcde	3,8 def	17,0 cdef	64,0 ghi	6,3 fg	1,2 de	3,5 de
T 7,5	15,5 def	62,5 ghij	6,4 de	1,3 abcde	3,5 fg	16,0 def	69,0 fgh	6,4 efg	1,1 defg	3,6 de
P 15	16,5 cdef	70,0 efgh	6,4 de	1,1 cdefg	3,7 efg	15,5 ef	62,5 hij	6,4 efg	1,3 cd	3,5 de
T 15	15,0 ef	73,5 def	6,8 c	1,1 defg	4,0 cdef	15,5 ef	75,5 ef	7,0 cd	1,0 efgh	4,0 de
P 30	20,5 b	83,5 abc	7,4 b	0,8 fgh	4,6 c	21,5 bc	85,5 abc	7,5 ab	0,8 hij	5,1 b
T 30	18,0 bcde	80,5 bcd	7,2 b	0,9 efgh	4,5 cde	21,5 bc	83,0 bcd	7,3 bc	0,9 ghij	4,9 bc
P 60	30,0 a	90,0 a	7,8 a	0,6 h	6,2 a	28,0 a	90,5 a	7,9 a	0,7 ij	7,0 a
T 60	19,0 bc	86,0 ab	7,3 b	0,8 gh	5,3 b	23,5 ab	89,5 ab	7,7 ab	0,6 j	6,2 a
P 15 + NP	18,0 bcde	61,5 hij	5,8 gh	1,5 abcd	3,8 def	20,0 bcd	66,5 ghi	6,0 gh	1,3 cd	3,9 de
P 15 + NK	18,5 bcde	61,0 hij	5,6 h	1,4 abcd	3,6 fg	20,5 bcd	61,5 ij	6,1 gh	1,7 b	4,3 bcde
P 15 + PK	16,5 cdef	71,0 efg	6,4 de	1,2 bcde	4,1 cdef	21,0 bcd	76,0 def	6,5 defg	1,0 efgh	4,1 cde
T 15 + NP	17,0 cdef	68,0 fghi	6,2 ef	1,2 bcdef	3,7 efg	18,0 cdef	70,5 fg	5,6 h	1,2 def	4,0 de
T 15 + NK	18,0 bcde	57,5 j	5,7 gh	1,6 ab	3,7 fg	16,0 def	70,5 fg	5,9 gh	1,2 def	3,9 de
T 15 + PK	18,0 bcde	77,0 cde	6,5 de	1,0 efg	4,0 cdef	15,5 ef	78,0 de	6,6 def	1,0 efgh	4,3 bcde
VC 20	17,0 cdef	59,5 ij	5,5 h	1,5 abc	3,6 fg	21,0 bcd	56,5 j	5,7 h	2,0 a	4,5 bcd

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$)

4.2.2.2 Disponibilidade de nutrientes no solo

Neste ítem serão apresentados e discutidos conjuntamente os efeitos residual e da reaplicação dos resíduos sobre a disponibilidade de macronutrientes no solo após o cultivo do sorgo.

4.2.2.2.1 Teores de fósforo

Os teores de fósforo disponível no solo variaram de 7,5 até 64,5 mg dm⁻³ no estudo do efeito residual dos RAF's (Figura 17). Não foi constatada diferença significativa nos teores de fósforo disponível residual até a dose de 15 t ha⁻¹ de ambos os resíduos.

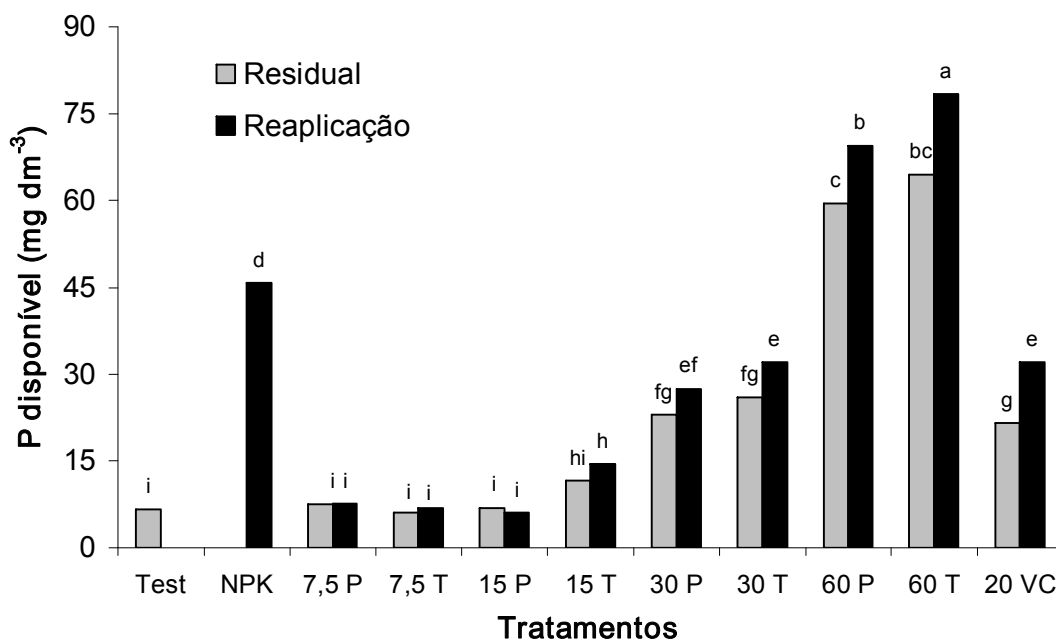


Figura 17. Fósforo disponível no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições)
Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Após o segundo cultivo, foi verificado nos tratamentos com adição de doses de 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF's que o teor de fósforo residual no solo permaneceu nas faixas consideradas "alto" e "muito alto", respectivamente

(CQFS/NRS, 2004). Não foi observada diferença significativa no teor de fósforo residual do solo entre os tratamentos (nas mesmas doses) com adição de RAF P e RAF T (Figura 17)

No estudo da reaplicação dos RAF's, o teor de P disponível no solo variou de 6,0 a 78,5 mg dm⁻³ de solo. Não foi observada diferença significativa no teor de P disponível no solo até a dose de 15 t ha⁻¹ de RAF P. Entretanto, a partir do tratamento P 30 e do tratamento T 15 foi observado incremento significativo no teor de P disponível com o aumento das doses de cada resíduo reaplicadas no solo (Figura 17). Em geral, o acréscimo no teor de P disponível com a reaplicação dos resíduos foi pequeno e/ou inexistente em relação às mesmas doses com o efeito residual

4.2.2.2.2 Teores de potássio

O teor de potássio (K) trocável nos tratamentos do estudo do efeito residual dos RAF's variou de 38,0 até 128,0 mg dm⁻³ de solo. Observou-se que todos os tratamentos do estudo do efeito residual da adição de RAF's apresentaram teores de K trocável superiores aos tratamentos: testemunha, com NPK e com adição do vermicomposto (VC) (Figura 18). Entretanto, os incrementos só foram significativos para os tratamentos com a adição do RAF T e para o tratamento P 60.

Embora tenha sido reaplicado K no tratamento com nutrientes minerais (NPK), o teor determinado no solo após o cultivo do sorgo foi considerado "baixo". Em geral, os teores de K trocável nos tratamentos com efeito residual foram maiores onde foi adicionado RAF T em relação ao RAF P. Conforme pode ser observado na Figura 18 e no Apêndice 5, os tratamentos com doses crescentes de resíduos apresentaram teores de K trocável residual na faixa de "médio a muito alto" e de "alto a muito alto", para o RAF P e para o RAF T, respectivamente (CQFS/NRS, 2004). Este fato comprova que os RAF's são boas fontes de potássio para os solos agrícolas, embora tenha sido verificada uma diminuição significativa nos teores de K trocável em relação aos determinados no solo após o primeiro cultivo.

No estudo do efeito da reaplicação dos RAF's foi observada variação no teor de K trocável de 42,5 até 213,5 mg dm⁻³. De maneira geral, como pode ser observado na Figura 18, o teor de K trocável foi maior no estudo da reaplicação dos resíduos e aumentou conforme a dose de resíduos adicionada ao solo. A exceção foi o tratamento com 30 t ha⁻¹ de RAF P. Este fato foi atribuído ao maior rendimento de matéria seca e a maior absorção e lixiviação de potássio observada neste tratamento em relação ao tratamento P 15 (Tabela 19).

O maior aumento no teor de K trocável com a reaplicação dos resíduos em relação ao teor residual foi determinado no tratamento com a adição da dose de 60 t ha⁻¹ de RAF T, sendo de aproximadamente 90 mg dm⁻³ (Figura 18). O teor de K trocável residual e nos tratamentos com a reaplicação dos resíduos pode ser verificado no Apêndice 5.

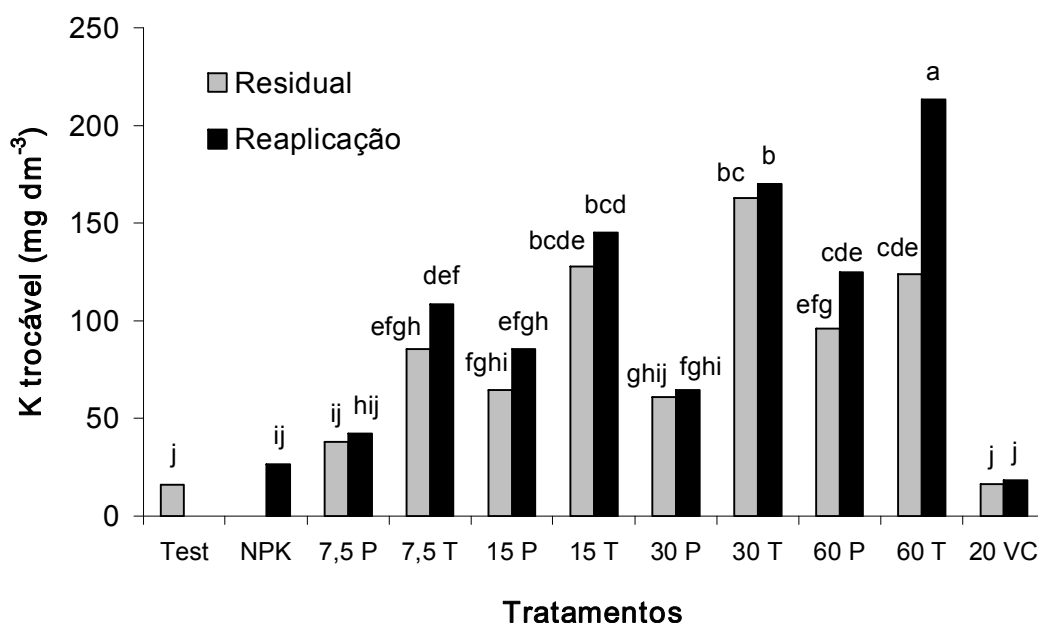


Figura 18. Potássio trocável determinado no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições)
Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

4.2.2.2.3 Teores de cálcio

O teor de cálcio trocável no estudo do efeito residual dos RAF's variaou de 1,4 até 4,3 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de solo . Verificou-se que o teor de cálcio no solo em todos os tratamentos do estudo do efeito residual dos RAF's foi maior que o da testemunha (Figura 19). Foi constatado, em todos os tratamentos com RAF's, que os teores residuais de cálcio no solo, determinados após o segundo cultivo, permaneceram no nível de suficiência ($> 2,0 \text{ cmol}_c \text{dm}^{-3}$) para a maioria das culturas agrícolas (CQFS/NRS, 2004).

A Figura 19 mostra que nos tratamentos com a adição de 30 e 60 t ha^{-1} do RAF P e com 60 t ha^{-1} do RAF T foram determinados os maiores teores de cálcio trocável residual no solo.

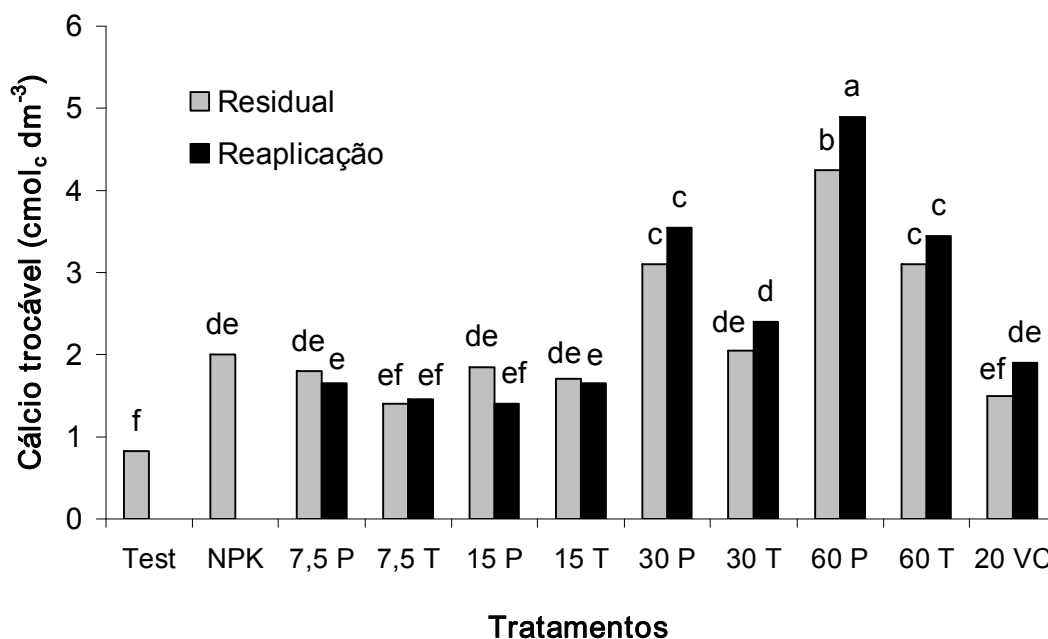


Figura 19. Teor de Ca trocável determinado no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições) Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Diferentemente do potássio, não foram verificadas diferenças nos teores de cálcio trocável determinados nas amostras de solo com adição dos RAF's após o primeiro cultivo e os teores determinados no estudo do efeito residual no solo após o segundo cultivo (Apêndices 3 e 5). Este fato concorda

com os dados de literatura sobre a menor mobilidade do íon Ca^{2+} em relação ao K^+ no perfil do solo (Meurer et al., 2000).

Embora tenha sido observada tendência de aumento, em geral, não foram determinados aumentos significativos do teor de cálcio trocável no solo com a reaplicação dos RAF's em relação aos tratamentos com o efeito residual, à exceção do tratamento com 60 t ha^{-1} de RAF P (Figura 19).

4.2.2.2.4 Teores de magnésio

Na Figura 20 são mostrados os teores de magnésio (Mg) trocável determinados após o cultivo do sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos RAF's. Pode-se observar que os teores residuais de Mg trocável variaram de 0,6 até $1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ com a adição de doses crescentes dos RAF's. O teor de magnésio trocável no estudo do efeito residual foi significativamente maior com a adição de doses a partir de 30 t ha^{-1} de RAF T. O teor residual de Mg no solo após segundo cultivo, à semelhança do Ca residual, tiveram pouca variação em relação aos determinados após o primeiro cultivo (Apêndices 3 e 5);

Conforme a CQFS/NRS (2004), o teor residual de Mg trocável no solo permaneceu, em todos os tratamentos com a adição dos RAF's, na faixa de suficiência ($> 0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para a maioria das culturas agrícolas.

O teor de Mg trocável no solo após a reaplicação dos RAF's também são mostrados na Figura 20. Pode-se observar que o teor de Mg trocável variou de 0,6 até $1,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, apresentando tendência de aumento com o aumento das doses de resíduos RAF T. Com base no teor de magnésio residual e após a reaplicação dos resíduos no solo no segundo cultivo (sorgo), observou-se a tendência de maior acúmulo de Mg no solo com a adição do RAF T em relação ao RAF P (Figura 20). Esta tendência já havia sido observada na determinação dos teores de magnésio das amostras de solo coletadas após o primeiro cultivo (Figura 12). Este fato pode estar relacionado com a menor absorção do Mg^{2+} devido à competição com o íon K^+ na solução do solo.

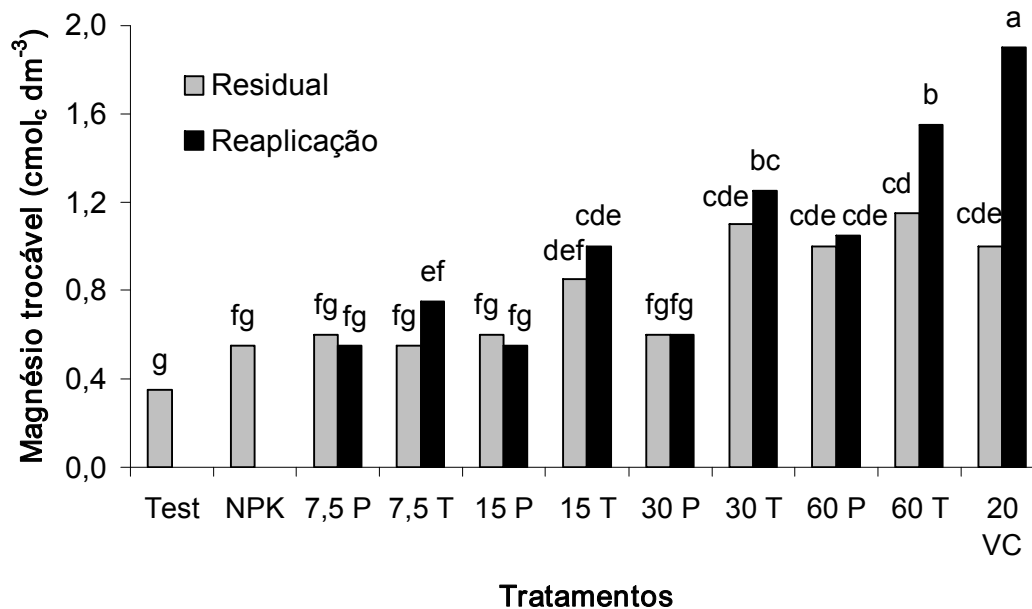


Figura 20. Teor de Mg trocável determinado no solo após o cultivo de sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições)
Médias acompanhadas por letras iguais não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

4.2.2.3 Absorção de macronutrientes pelas plantas e caracterização da água de lixiviação

Neste ítem serão apresentados e discutidos os teores de macronutrientes na parte aérea das plantas e as quantidades absorvidas pelas plantas e as retiradas por lixiviação. A soma destas duas últimas frações foi considerada como a retirada total do sistema solo-planta. Os teores de macronutrientes no tecido (%) e na água de lixiviação (mg L^{-1}) são dados nos Apêndices 6 e 7, respectivamente.

4.2.2.3.1 Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado

4.2.2.3.1.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos

Na Tabela 15 são apresentadas as quantidades de N na parte aérea das plantas e as lixiviadas no estudo do efeito residual dos RAF's durante o cultivo do sorgo. A quantidades de N na parte aérea das plantas variou de 31,0 até 857,9 mg vaso⁻¹.

Pode-se observar que o tratamento com 60 t ha⁻¹ do RAF P apresentou maior absorção de N e também maior rendimento de MS (Tabela 12). Foi verificado que a adição de N mineral nos tratamentos com a dose de 15 t ha⁻¹ de RAF P e RAF T possibilitou maior absorção de N pelas plantas e tendência de rendimentos de MS superiores à mesma dose dos resíduos sem a complementação com N (Tabela 12). Isso indica que o nitrogênio pode ter sido um dos fatores limitantes do rendimento nestes tratamentos.

A perda de N por lixiviação variou de 0,7 até 968,3 mg vaso⁻¹ e de 5,4 até 196,7 mg vaso⁻¹ na forma amoniacal (N-NH₄⁺) e nítrica (NO₂⁻ + NO₃⁻), respectivamente. Pode-se verificar que a perda de N por lixiviação no estudo do efeito residual foi predominantemente na forma nítrica, apesar da maior variação verificada para a forma amoniacal. As exceções foram os tratamentos P 60 e T 60 que apresentaram teores considerados altos de N amoniacal na água de lixiviação. Este fato pode ser devido à ação conjunta dos fatores: elevação excessiva do pH, grande quantidade de N adicionada com os resíduos e à baixa CTC do solo, discutidos anteriormente.

De maneira geral, incrementos na quantidade absorvida de N pelas plantas propiciaram aumentos no rendimento de MS nos tratamentos sob o efeito residual dos RAF's (Tabela 12 e Tabela 15). Também foi verificado que, a partir da dose de 15 t ha⁻¹, a perda de N mineral por lixiviação foi significativamente maior nos tratamentos com a adição de RAF T em relação ao RAF P (Tabela 15).

Tabela 15. Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado do solo no estudo do efeito residual dos RAF's durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições)

Tratamento	N absorvido	N lixiviado		Total
		NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻	
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Testemunha	31,0 f	2,1 c	31,0 fg	64,0 g
NPK	673,9 ab	14,2 c	131,1 c	819,2 c
RAF P 7,5	99,5 e	1,1 c	23,4 gh	124,0 fg
RAF T 7,5	133,8 e	0,7 c	25,9 gh	160,4 fg
RAF P 15	164,4 e	3,7 c	24,2 gh	192,2 fg
RAF T 15	186,6 de	1,8 c	100,3 d	288,8 f
RAF P 30	507,5 bc	4,5 c	159,2 b	671,2 cde
RAF T 30	372,9 cd	11,0 c	196,7 a	580,6 de
RAF P 60	857,9 a	92,1 b	55,8 e	1005,9 b
RAF T 60	438,0 c	968,3 a	35,0 efg	1441,3 a
RAF P 15 + NP	663,0 b	14,9 c	54,6 ef	732,4 cd
RAF P 15 + NK	444,6 c	17,7 c	80,3 d	542,7 de
RAF P 15 + PK	217,5 de	5,2 c	40,6 efg	263,3 f
RAF T 15 + NP	403,9 c	19,7 c	86,1 d	509,6 e
RAF T 15 + NK	446,9 c	7,3 c	44,2 efg	498,4 e
RAF T 15 + PK	186,9 de	3,9 c	38,1 efg	228,9 fg
VC 20	49,9 ef	2,9 c	5,4 h	58,2 g

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

4.2.2.3.1.2 Efeito da reaplicação dos resíduos

Na Tabela 16 pode-se verificar que a quantidade de N absorvido pelas plantas variou de 144,8 até 951,7 mg vaso⁻¹. Foi constatada a tendência de aumento na quantidade de N absorvido nos tratamentos com a reaplicação dos resíduos em relação ao estudo do efeito residual, à exceção do tratamento T 15 + NK. A saturação de K⁺ nesse tratamento parece ter interferido na absorção de nutrientes pelas plantas, à semelhança do que foi observado no primeiro cultivo (Tabela 19).

Tabela 16. Nitrogênio na parte aérea das plantas e lixiviado do solo no estudo do efeito da reaplicação dos RAF's durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições)

Tratamento	N absorvido	N lixiviado		Total
		NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻	
----- mg vaso ⁻¹ -----				
Testemunha	31,0 g	2,1 cd	31,0 de	64,0 i
NPK	673,9 b	14,2 cd	131,1 cd	819,2 de
RAF P 7,5	144,8 efg	1,7 cd	48,7 de	195,2 ijl
RAF T 7,5	211,3 efg	0,7 d	25,8 e	237,8 hij
RAF P 15	341,3 de	4,0 cd	41,7 de	387,0 gh
RAF T 15	448,8 cd	4,7 cd	191,2 c	644,6 f
RAF P 30	854,3 a	24,7 c	302,0 b	1181,0 b
RAF T 30	410,3 d	7,2 cd	465,4 a	882,9 cd
RAF P 60	870,7 a	188,6 b	131,4 cd	1190,8 b
RAF T 60	661,1 b	930,3 a	85,2 de	1676,6 a
RAF P 15 + NP	951,7 a	10,0 cd	70,6 de	1032,2 bc
RAF P 15 + NK	587,4 bc	18,5 cd	109,1 cde	714,9 ef
RAF P 15 + PK	292,6 def	3,9 cd	32,5 de	329,1 ghi
RAF T 15 + NP	833,9 a	19,0 cd	95,0 cde	947,9 cd
RAF T 15 + NK	342,9 de	10,7 cd	83,7 de	437,4 g
RAF T 15 + PK	313,5 de	2,9 cd	42,1 de	358,6 ghi
VC 20	116,5 fg	2,5 cd	13,7 e	132,7 jl

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

A perda de N lixiviado variou de 0,7 até 930,3 mg vaso⁻¹ e de 13,7 até 465,4 mg vaso⁻¹, na forma amoniacal e nítrica, respectivamente. Foi observada maior perda de N na forma nítrica em relação ao N na forma amoniacal na maioria dos tratamentos com a reaplicação dos resíduos, à semelhança do que ocorreu no estudo do efeito residual. Também foi verificado acréscimo significativo na quantidade de N mineral lixiviada no estudo da reaplicação dos resíduos em relação ao observado nos tratamentos sob o efeito residual.

Foi constatado que, a partir da dose de 30 t ha⁻¹, houve maior absorção de nitrogênio nos tratamentos com o RAF P em relação ao RAF T. Por outro lado, a perda de N mineral foi maior nos tratamentos com RAF T (Tabela 16). A saturação de K⁺ pode estar relacionada à perda de N amoniacal e, conseqüentemente, à menor absorção de nitrogênio pelas plantas.

Conforme observado nos tratamentos com o efeito residual dos RAF's, incrementos de absorção de nitrogênio pelas plantas também resultaram em aumento no rendimento de MS com reaplicação dos resíduos. Em média, o aumento observado no rendimento de MS com a reaplicação dos resíduos foi de 47,5% em relação aos tratamentos com o efeito residual (Tabela 12).

4.2.2.3.2 Fósforo na parte aérea das plantas

A absorção de fósforo pelas plantas que variou de 7,4 mg até 90,8 mg vaso⁻¹ e de 12,2 até 122,8 mg vaso⁻¹ nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos, respectivamente (Tabela 17).

Embora semelhantes, observou-se que houve a tendência de maior absorção de fósforo pelas plantas nos tratamentos com o RAF T em relação ao RAF P com adição da dose de até 15 t ha⁻¹ dos resíduos, tanto nos tratamentos do estudo do efeito residual como da reaplicação dos resíduos. Por outro lado, nos tratamentos com maior adição dos resíduos (30 e 60 t ha⁻¹), foi determinada que houve absorção de fósforo significativamente maior nos tratamentos com a adição do RAF P.

Os teores de P no tecido dos tratamentos com até 15 t ha⁻¹ de RAF's foram, em geral, considerados baixos (< 0,20 %) pela CQFS/NRS (2004), tanto no estudo do efeito residual como no da reaplicação dos resíduos. Isso pode ter comprometido o rendimento de MS desses tratamentos à semelhança do primeiro cultivo. Por outro lado, as doses maiores de resíduos proporcionaram teores considerados adequados à cultura do sorgo (Apêndice 6). Isso é coerente com os aumentos no rendimento de MS (Tabela 12) e com o teor de P disponível determinado no solo após o cultivo do sorgo (Apêndice 5).

Tabela 17. Fósforo na parte aérea das plantas de sorgo no estudo do efeito residual e da reaplicação dos RAF's (média de duas repetições)

Tratamento	P absorvido		Acréscimo da reaplicação
	Residual	Reaplicação	
	----- mg vaso ⁻¹ -----		%
Testemunha	2,2 h	2,2 j	-----
NPK + calcário	89,0 ab	89,0 bc	-----
RAF P 7,5	7,4 gh	12,2 ij	63,5
RAF T 7,5	13,4 gh	23,0 hij	71,0
RAF P 15	18,9 fgh	38,3 fgghi	102,5
RAF T 15	20,8 fgh	51,3 efgh	146,3
RAF P 30	65,0 abcd	108,7 ab	67,1
RAF T 30	49,4 cdef	51,1 efgh	3,4
RAF P 60	88,5 ab	106,2 ab	20,0
RAF T 60	35,0 defgh	67,2 cdef	91,9
RAF P 15 + NP	78,0 abc	122,8 a	57,4
RAF P 15 + NK	33,2 efgh	55,1 defg	65,9
RAF P 15 + PK	63,7 abcde	85,4 bcd	34,1
RAF T 15 + NP	90,8 a	105,0 ab	15,7
RAF T 15 + NK	37,8 defg	30,4 ghij	-19,6
RAF T 15 + PK	57,6 bcde	72,6 cde	26,1
VC 20	20,4 fgh	40,7 fgghi	99,4
Média			56,3

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

De maneira geral, foi determinado aumento na absorção de fósforo pelas plantas com a reaplicação dos resíduos, à exceção do tratamento T15 + NK. O acréscimo médio na absorção de fósforo com a reaplicação dos resíduos foi de 56,3%, variando de 3,4 até 146,3% (Tabela 17).

4.2.2.3.3 Potássio na parte aérea das plantas e no lixiviado

4.2.2.3.3.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos

Na Tabela 18 são apresentadas as quantidades de potássio absorvido, lixiviado e a retirada total no estudo do efeito residual dos RAF's.

Tabela 18. Potássio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado durante o cultivo do sorgo no estudo do efeito residual dos RAF's (média de duas repetições)

Tratamento	K absorvido	K lixiviado	K Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	31,2 f	28,3 h	59,5 m
NPK	750,0 bc	87,3 h	837,3 hij
RAF P 7,5	156,9 ef	149,5 gh	306,4 lm
RAF T 7,5	356,7 def	188,5 gh	545,2 ijl
RAF P 15	349,9 def	80,4 h	430,3 jlm
RAF T 15	439,3 cde	529,3 fg	968,6 hi
RAF P 30	975,4 ab	721,3 ef	1696,7 f
RAF T 30	767,4 bc	5336,5 b	6104,0 b
RAF P 60	1141,2 a	3879,5 c	5020,7 c
RAF T 60	768,1 bc	19906,2 a	20674,3 a
RAF P 15 + NP	571,5 cd	209,4 gh	780,9 hijl
RAF P 15 + NK	628,9 cd	559,2 fg	1188,1 gh
RAF P 15 + PK	536,1 cd	254,7 gh	790,8 hij
RAF T 15 + NP	1131,7 a	1024,5 e	2156,2 e
RAF T 15 + NK	742,2 bc	2503,8 d	3246,0 d
RAF T 15 + PK	574,9 cd	857,6 ef	1432,5 fg
VC 20	89,7 f	818,3 ef	907,9 hij

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

A quantidade de K absorvido e lixiviado apresentou grande variação entre os tratamentos com adição dos RAF's, à semelhança do que foi verificado no primeiro cultivo. O K absorvido pelas plantas variou de 156,9 até

1141,2 mg vaso⁻¹, enquanto que o K lixiviado variou de 80,4 até 19906,2 mg vaso⁻¹.

Conforme observado anteriormente para os macronutrientes nitrogênio e fósforo, a quantidade absorvida de potássio pelas plantas aumentou com as doses dos resíduos adicionadas ao solo, à exceção do tratamento T 60 (Tabela 18). Verificou-se que até a dose de 15 t ha⁻¹ dos resíduos não houve diferença estatística na absorção de K entre os tratamentos com as adições de ambos os RAF's. Em doses maiores houve tendência de maiores extrações de potássio pelas plantas nos tratamentos com a adição do RAF P em relação ao RAF T. Por outro lado, as perdas por lixiviação e o K retirado total do solo nos tratamentos com as doses maiores do que 15 t ha⁻¹ foram significativamente maiores nos tratamentos com adição do RAF T (Figura 20).

Pela comparação da Tabela 18 (segundo cultivo) e da Tabela 9 (referente ao primeiro cultivo), constatou-se que a lixiviação de potássio nos tratamentos com as adições de RAF P e principalmente de RAF T foram bem maiores no segundo cultivo, à semelhança do nitrogênio. Isso foi atribuído ao maior volume de lixiviado no segundo cultivo (Apêndice 7) e a possível saturação (durante o primeiro cultivo) da camada subsuperficial de solo no vaso.

4.2.2.3.3.1 Efeito da reaplicação dos resíduos

Na Tabela 19 pode-se observar que o teor de K absorvido pelas plantas apresentou tendência de aumento em relação ao determinado no estudo do efeito residual (Tabela 18); a quantidade de K lixiviada e a quantidade retirada total do solo apresentou a mesma tendência de aumento. Este fato já era esperado devido à adição de resíduos (com alto teor de K) em solos que já apresentavam teores de potássio trocável considerados de “médio” a “muito alto” pela CQFS/NRS (2004) após o primeiro cultivo (Figura 12).

No Apêndice 6 pode ser observado que todos os tratamentos com a reaplicação dos RAF's apresentaram teores de K no tecido acima da faixa

considerada adequada à cultura do sorgo (1,4 a 2,5%) CQFS/NRS (2004). Isso foi mais evidente nos tratamentos com a adição do RAF T, à exceção do tratamento P 15 + NP, possivelmente devido à maior produção de MS no mesmo.

Tabela 19. Potássio na parte aérea das plantas e lixiviado no estudo do efeito da reaplicação dos resíduos no cultivo do sorgo (média de duas repetições)

Tratamento	K absorvido		K lixiviado		K Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----				
Testemunha	31,2	d	28,3	i	59,5 i
NPK	750,0	cd	87,3	i	837,3 gh
RAF P 7,5	228,1	d	137,8	i	365,9 hi
RAF T 7,5	611,3	cd	234,4	hi	845,7 gh
RAF P 15	719,1	cd	121,5	i	840,6 gh
RAF T 15	943,1	bc	1273,7	e	2216,9 de
RAF P 30	1547,7	a	1144,7	ef	2692,4 d
RAF T 30	880,8	cd	5811,4	b	6692,2 b
RAF P 60	1353,0	a	4854,3	c	6207,2 b
RAF T 60	1221,6	ab	21843,2	a	23064,8 a
RAF P 15 + NP	862,5	cd	334,0	ghi	1196,5 g
RAF P 15 + NK	813,2	cd	667,0	gh	1480,1 fg
RAF P 15 + PK	744,4	cd	398,3	ghi	1142,7 g
RAF T 15 + NP	1308,1	a	1223,4	e	2531,5 de
RAF T 15 + NK	566,3	d	3537,6	d	4103,9 c
RAF T 15 + PK	794,9	cd	1138,2	ef	1933,0 ef
VC 20	201,6	d	757,2	fg	958,7 gh

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Embora a disponibilidade de potássio nos tratamentos com as doses de 30 e 60 t ha⁻¹ de RAF T tenha sido maior, foi verificada a tendência de menor absorção de K pelas plantas em relação às mesmas doses de RAF P. Este fato está relacionado com o menor acúmulo de MS pelas plantas.

4.2.2.3.4 Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado

4.2.2.3.4.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos

Na Tabela 20 são dadas as quantidades de cálcio na parte aérea das plantas e lixiviadas no estudo do efeito residual da aplicação dos RAF's. A quantidade de cálcio absorvida pelas plantas na parte aérea variou de 20,7 até 148,1 mg vaso⁻¹.

Tabela 20. Cálcio na parte aérea das plantas e lixiviado no estudo do efeito residual durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições)

Tratamento	Ca absorvido			Ca lixiviado			Ca total		
	----- mg vaso ⁻¹ -----								
Testemunha	9,0	g		469,8	ghi		478,8	gh	
NPK	130,6	ab		399,5	hi		530,1	fgh	
RAF P 7,5	23,1	efg		373,7	hi		396,8	h	
RAF T 7,5	20,7	fg		398,4	hi		419,1	h	
RAF P 15	41,1	def		315,0	i		356,1	h	
RAF T 15	26,2	efg		359,0	i		385,2	h	
RAF P 30	109,8	b		651,1	cdef		760,9	cde	
RAF T 30	40,3	defg		781,2	bc		821,5	bcd	
RAF P 60	134,3	ab		1566,6	a		1700,9	a	
RAF T 60	49,5	cdef		551,3	efgh		600,8	efg	
RAF P 15 + NP	148,1	a		818,7	bc		966,8	b	
RAF P 15 + NK	72,0	c		859,9	b		931,9	bc	
RAF P 15 + PK	54,3	cde		675,3	cde		729,6	de	
RAF T 15 + NP	70,2	cd		583,9	defg		654,0	def	
RAF T 15 + NK	44,6	cdef		750,3	bcd		795,0	bcd	
RAF T 15 + PK	27,0	efg		492,9	fghi		520,0	fgh	
VC 20	21,6	fg		338,1	i		359,7	h	

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Foi verificado que as plantas dos tratamentos com RAF P apresentaram a tendência de absorver maior quantidade de cálcio do solo em

relação às mesmas doses de RAF T (Tabela 20). Isso pode ser atribuído à maior disponibilidade de cálcio nos resíduos RAF P e à menor saturação de K^+ na solução do solo desses tratamentos.

Embora os teores de cálcio no tecido do sorgo nos tratamentos com a adição de RAF P tenham sido significativamente maiores, os teores nos tratamentos com a adição de RAF T (> 0,20 %) foram considerados suficientes para o desenvolvimento das plantas CQFS/NRS (2004) (Apêndice 6).

Foi determinado que os tratamentos com adição da dose de 15 t ha^{-1} de RAF P e RAF T mais nutrientes minerais apresentaram tendência de maior absorção de cálcio pelas plantas de sorgo

As quantidades de cálcio lixiviadas variaram de 315,0 até 1566,6 mg vaso^{-1} . Em geral, a quantidade de cálcio lixiviada nos vasos foi muito superior à absorvida pelas plantas, diferentemente do que foi observado no cultivo do milho (Tabela 9). A quantidade de cálcio lixiviada também foi maior no segundo cultivo em relação à observada no primeiro cultivo, à semelhança do nitrogênio e do potássio, conforme discutido anteriormente.

4.2.2.3.4.2 Efeito da reaplicação dos resíduos

Na Tabela 21 pode-se verificar que a quantidade de cálcio absorvida no estudo da reaplicação dos resíduos variou de 30,2 até 195,6 mg vaso^{-1} . Foi observada a tendência de maior absorção de cálcio nos tratamentos com o RAF P em relação as mesmas doses de RAF T (Tabela 21). Resultados semelhantes haviam sido constatados no primeiro cultivo (milho) e no segundo cultivo (efeito residual). Foi observado que a adição de nitrogênio e de fósforo na forma mineral no tratamento com a dose intermediária de RAF P, propiciou a maior absorção de cálcio entre os tratamentos estudados (Tabela 21).

A quantidade de cálcio lixiviada no estudo do efeito da reaplicação dos resíduos variou de 377,5 até 1781,4 mg vaso^{-1} . Pode-se observar que não houve diferença estatística entre a quantidade de Ca^{2+} lixiviada nos tratamentos testemunha, NPK + calcário e com doses de RAF's até 15 t ha^{-1} .

Tabela 21. Cálcio na parte aérea das plantas (MS) e lixiviado no estudo do efeito da reaplicação dos resíduos durante o cultivo do sorgo (média de duas repetições)

Tratamento	Ca absorvido	Ca lixiviado	Ca total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	9,0 h	469,8 fghi	478,8 fgh
NPK	130,6 c	399,5 hi	530,1 efgh
RAF P 7,5	30,2 gh	377,5 i	407,7 h
RAF T 7,5	30,4 gh	390,4 hi	420,8 gh
RAF P 15	80,5 de	396,3 hi	476,7 fgh
RAF T 15	49,1 efg	597,7 efgh	646,8 defg
RAF P 30	179,1 ab	835,7 cd	1014,8 c
RAF T 30	44,3 efgh	711,3 de	755,5 de
RAF P 60	151,5 bc	1781,4 a	1932,9 a
RAF T 60	46,3 efgh	513,9 efghi	560,2 efgh
RAF P 15 + NP	195,6 a	649,6 def	845,1 cd
RAF P 15 + NK	97,0 d	1269,2 b	1366,1 b
RAF P 15 + PK	82,9 de	711,6 de	794,5 d
RAF T 15 + NP	78,0 def	615,2 efg	693,2 def
RAF T 15 + NK	40,4 fgh	994,0 c	1034,5 c
RAF T 15 + PK	38,6 gh	684,0 de	722,6 de
VC 20	32,8 gh	402,4 hi	435,2 gh

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

A quantidade de cálcio lixiviada no tratamento testemunha foi muito alta. Entretanto, a Tabela 1 mostra que o teor de cálcio determinado na camada superficial do solo PVAd (0-20 cm) foi muito superior aos teores normais dessa classe de solo. É possível que o local de coleta tenha sido anteriormente contaminado com alguma fonte de cálcio (p. ex. resíduo de construção civil). Como o solo apresenta baixa CTC, é possível que o cálcio tenha sido lixiviado durante os cultivos; o baixo teor de cálcio trocável ($0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) determinado nas amostras de solo do tratamento testemunha após o cultivo do sorgo ampara esta hipótese (Apêndice 5).

4.2.2.3.5 Magnésio na parte aérea das plantas e lixiviado

4.2.2.3.5.1 Efeito residual da aplicação dos resíduos

A quantidade de magnésio absorvido pelas plantas variou de 20,4 a 133,5 mg vaso⁻¹ no estudo do efeito residual da aplicação dos RAF's (Tabela 22). Foi observado que, à semelhança do primeiro cultivo, a quantidade de magnésio absorvida apresentou tendência de aumento nos tratamentos com adição do RAF P em relação ao RAF T (Tabela 22). Na mesma tabela pode-se verificar que a adição de N e P (NP) na forma mineral nos tratamentos com a dose de 15 t ha⁻¹ do RAF P e RAF T proporcionou aumento na absorção de magnésio em relação às mesmas doses sem a adição dos nutrientes.

A absorção de magnésio aumentou com as doses dos RAF's adicionadas ao solo, à semelhança dos outros macronutrientes estudados anteriormente, sendo o incremento mais significativo nos tratamentos com adição do RAF P (Tabela 22).

4.2.2.3.5.2 Efeito da reaplicação dos resíduos

A quantidade de magnésio absorvida pelas plantas no estudo da reaplicação dos resíduos variou de 25,5 até 183,6 mg vaso⁻¹. A quantidade de magnésio absorvida pelas plantas apresentou tendência de aumento até os tratamentos T 15 e P 30, com as adições do RAF T e do RAF P, respectivamente. Acima destas doses não foi observado aumento significativo na absorção de Mg com o aumento das doses de resíduos (Tabela 23). Verificou-se que a absorção de magnésio aumentou significativamente com a adição de N e P (NP) na forma mineral nos tratamentos com a dose de 15 t ha⁻¹ do RAF P e RAF T (Tabela 23). Esse comportamento já havia sido determinado anteriormente para os nutrientes N, P, K e Ca no estudo da reaplicação dos resíduos. Este fato pode ser atribuído ao maior rendimento de MS determinado nestes tratamentos em relação às mesmas doses sem a adição dos nutrientes minerais (Tabela 12).

Tabela 22. Magnésio na parte aérea das plantas de sorgo e lixiviado no estudo do efeito residual da aplicação dos resíduos (média de duas repetições)

Tratamento	Mg absorvido	Mg lixiviado	Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	7,7 g	249,7 g	257,4 h
NPK	134,5 a	287,2 fg	421,8 efgh
RAF P 7,5	20,4 fg	247,0 g	267,4 h
RAF T 7,5	22,2 efg	312,4 efg	334,6 gh
RAF P 15	36,9 defg	256,0 g	293,0 h
RAF T 15	32,9 defg	358,9 defg	391,9 fgh
RAF P 30	94,6 bc	603,1 cd	697,8 cd
RAF T 30	61,6 cde	606,8 cd	668,4 cde
RAF P 60	120,9 ab	1443,5 a	1564,4 a
RAF T 60	64,2 cd	912,3 b	976,4 b
RAF P 15 + NP	133,5 ab	773,3 bc	906,8 bc
RAF P 15 + NK	53,2 def	961,8 b	1015,0 b
RAF P 15 + PK	49,1 def	591,1 cde	640,1 def
RAF T 15 + NP	103,0 ab	382,0 defg	485,0 defgh
RAF T 15 + NK	59,7 cdef	490,9 defg	550,6 def
RAF T 15 + PK	40,1 defg	566,4 cdef	606,5 def
VC 20	27,6 defg	222,0 g	249,7 h

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

A quantidade de magnésio lixiviada no estudo da reaplicação dos RAF's variou de 265,0 até 1755,2 mg vaso⁻¹. Não foram observadas diferenças significativas entre a quantidade de magnésio lixiviada nos tratamentos com as adições do RAF P e RAF T até a dose de 30 t ha⁻¹ (Tabela 23). Foi observada a tendência de aumento da quantidade de Mg lixiviada com o aumento das doses adicionadas de ambos os resíduos.

Tabela 23. Magnésio na parte aérea das plantas de sorgo e lixiviado no estudo da reaplicação dos resíduos (média de duas repetições)

Tratamento	Mg absorvido	Mg lixiviado	Total
	----- mg vaso ⁻¹ -----		
Testemunha	7,7 e	249,7 g	257,4 j
NPK	134,5 b	287,2 fg	421,8 efghij
RAF P 7,5	25,5 de	265,0 g	290,5 hij
RAF T 7,5	37,1 cde	294,1 fg	331,2 ghij
RAF P 15	70,1 cd	310,0 efg	380,1 fghij
RAF T 15	66,5 cd	551,0 def	617,5 defg
RAF P 30	150,4 ab	723,8 cd	874,2 cd
RAF T 30	62,3 cd	513,1 defg	575,4 defgh
RAF P 60	145,8 ab	1755,2 a	1901,0 a
RAF T 60	79,7 c	1171,1 b	1250,9 b
RAF P 15 + NP	183,6 a	501,0 defg	684,6 de
RAF P 15 + NK	74,7 cd	964,7 bc	1039,5 bc
RAF P 15 + PK	72,4 cd	576,3 de	648,7 def
RAF T 15 + NP	126,2 b	501,4 defg	627,6 defg
RAF T 15 + NK	58,9 cd	547,3 def	606,2 defg
RAF T 15 + PK	60,6 cd	498,6 defg	559,2 efghi
VC 20	36,0 cd	233,6 g	269,6 ij

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Foi lixiviada maior quantidade de magnésio em relação à absorvida pelas plantas, à semelhança do que foi verificado para o cálcio (Tabelas 20 e 21) e para o magnésio residual (Tabela 22). Apesar disso, conforme CQFS/NRS (2004) não foi determinado teor de magnésio, nas amostras de tecido das plantas de sorgo, abaixo da faixa adequada para a cultura (0,15 a 0,50%) (Apêndice 6). Este fato é coerente com a quantidade de magnésio adicionada com os resíduos no solo e com os teores de magnésio determinados no solo após o segundo cultivo (Figura 22).

4.2.2.3.6 Teor de sódio, pH e condutividade elétrica do lixiviado

Na Tabela 24 são dados os valores do teor de sódio (Na), do pH e da condutividade elétrica (CE) determinados na água de lixiviação durante o cultivo do sorgo, nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos. A quantidade de sódio lixiviada nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos variou de 160,3 até 2729,6 mg vaso⁻¹ e de 162,1 até 4041,8 mg vaso⁻¹, respectivamente. A quantidade de sódio determinada no segundo cultivo (sorgo) aumentou em relação ao primeiro cultivo (milho), conforme também verificado com os macronutrientes N, K, Ca e Mg. Foi observado que o tratamento com a adição da CDA apresentou maior quantidade de Na no lixiviado, à semelhança do primeiro cultivo. Entretanto, diferentemente do primeiro cultivo, a quantidade de Na foi bem maior em relação aos demais tratamentos. Embora tenha sido observada pequena tendência de aumento da quantidade de Na no lixiviado dos tratamentos com adição do RAF T, não foram detectadas diferenças entre os tratamentos com adição de ambos resíduos nos estudos do efeito residual da aplicação dos resíduos (Tabela 24). Entretanto, o lixiviado do tratamento T 60 apresentou quantidade significativamente maior de Na em relação ao tratamento com a adição da mesma dose de RAF P no estudo da reaplicação dos resíduos. Em geral, não foram observadas variações significativas nas quantidades de sódio lixiviadas entre os estudos do efeito residual e com a reaplicação dos resíduos.

O valor de pH variou de 7,6 até 8,4 e de 7,8 até 8,7 nos estudos do efeito residual e com a reaplicação dos resíduos, respectivamente (Tabela 24). À exceção dos tratamentos com a adição de 30 e 60 t ha⁻¹, não foram constatadas diferenças significativas nos valores de pH do lixiviado entre os tratamentos com adição dos resíduos; também não foram observadas diferenças significativas entre os valores de pH nos tratamentos do estudo do efeito residual e da reaplicação dos resíduos. Os valores de pH determinados foram em média de 7,9 e 8,0 nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos, respectivamente; portanto, pouco maiores do que foi determinado no lixiviado do primeiro cultivo.

O valor de condutividade elétrica (CE) determinado no lixiviado dos tratamentos com o estudo do efeito residual e da reaplicação dos resíduos

variou de 399 até 5985 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e de 460 até 7375 $\mu\text{S cm}^{-1}$, respectivamente (Tabela 24). Foi verificada tendência de aumento nos valores de CE no estudo da reaplicação dos resíduos. Este fato é devido ao aumento da concentração de cátions básicos no lixiviado, verificado na maioria dos tratamentos.

Pode-se observar, em ambos os estudos, a tendência de maior CE no lixiviado dos tratamentos com a adição do RAF T, à semelhança do primeiro cultivo.

Tabela 24. Sódio lixiviado, valores de pH e condutividade elétrica (CE) da água de lixiviação coletada durante o cultivo do sorgo nos estudos do efeito residual e da reaplicação dos resíduos (média de duas repetições)

Tratamento	----- Efeito residual -----			----- Efeito da reaplicação -----		
	Na	pH	CE	Na	pH	CE
	--- mg vaso ⁻¹ ---		--- μS cm ⁻¹ ---	--- mg vaso ⁻¹ ---		--- μS cm ⁻¹ ---
Testemunha	73,2 h	7,85 cdef	357 h	73,2 h	7,85 de	357 i
NPK	285, fgh	7,55 g	794 fgh	285,1 fgh	7,55 f	794 h
RAF P 7,5	324,5 efgh	7,95 bcde	606 gh	362,2 efgh	8,05 cde	710 hi
RAF T 7,5	380,1 efgh	8,05 bc	832 fgh	414,3 defgh	7,95 cdef	686 hi
RAF P 15	303,1 fgh	8,00 bcd	627 gh	404,5 efgh	7,90 cde	769 h
RAF T 15	457,7 efg	7,75 defg	970 fgh	561,6 cdefg	7,80 e	1660 efg
RAF P 30	603,7 cdef	8,15 b	1350 ef	670,5 cdef	8,15 c	1855 e
RAF T 30	654,3 cde	8,40 a	2775 c	649,8 cdef	8,45 b	3460 c
RAF P 60	833,1 bcd	7,65 fg	3910 b	947,3 c	7,85 de	4590 b
RAF T 60	1100,7 b	8,45 a	5985 a	1358,8 b	8,75 a	7375 a
RAF P 15 + NP	339,7 efgh	7,65 fg	1804 de	398,4 efgh	8,10 cd	1357 g
RAF P 15 + NK	577,7 cdef	7,70 efg	2270 cd	757,4 cde	7,85 de	2510 d
RAF P 15 + PK	893,3 bc	8,15 b	1440 ef	683,5 cdef	8,15 c	1334 g
RAF T 15 + NP	537,3 def	7,7 efg	1387 ef	824,8 cd	7,85 de	1761 ef
RAF T 15 + NK	403,4 efgh	7,65 fg	2250 cd	464,8 defgh	7,80 e	2575 d
RAF T 15 + PK	528,2	7,9 bcdef	1239 efg	684,8 cdef	8,00 cdef	1718 efg
CDA 15	2729,6 a	8,05 bc	1125 fg	4041,8 a	8,15 c	1445 fg
VC 20	160,3 gh	8,05 bc	399 h	162,1 gh	8,10 cd	460 hi

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$)

4.3 Experimento III – Avaliação da adição dos resíduos no pH e na acidez potencial do solo

Neste experimento foram utilizados três classes de solo com diferentes teores de argila e matéria orgânica do solo, a saber: a) um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico - PVAd (U.M. Itapuã); b) um Argissolo Vermelho distrófico típico - PVd (U.M. São Jerônimo) e c) um Nitossolo Vermelho distroférico latossólico - NVdf (U.M. Estação). Os solos foram enquadrados nas classes 4, 3 e 2 em relação aos teores de argila, respectivamente (CQFS/NRS, 2004). As principais características dos solos são dadas na Tabela 1.

A argila e a matéria orgânica são as principais fontes dos ácidos que compõem a acidez potencial ou titulável a pH 7,0, sendo bons indicadores da capacidade de tamponamento da acidez dos solos (Volkweiss, 1989).

A seguir serão apresentados e discutidos os efeitos da adição de doses crescentes do RAF P e RAF T em relação à acidez ativa (pH em água) e à acidez potencial (H + Al), avaliada pelo índice SMP, nos diferentes solos utilizados no experimento.

Foram utilizadas as doses de calcário ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$, produtos técnicos na proporção molar de 3:1) de 0,80, 4,80 e 9,10 t ha⁻¹ (conforme recomendação pelo índice SMP para elevar o pH a 6,0) nos solos PVAd, PVd e NVdf, respectivamente.

4.3.1. Efeitos da adição dos resíduos na acidez ativa do solo

A adição de materiais de reação alcalina em solos ácidos provoca grandes modificações em algumas propriedades químicas em curtos períodos de tempo. As modificações nos componentes da acidez podem ser acompanhadas por determinações periódicas destas características, até atingir condições de equilíbrio, geralmente após 30 dias de aplicação dos materiais corretivos, levando-se em conta condições ótimas para as reações ácido-base (umidade, temperatura, granulometria, etc.). Em geral, quanto menor a

granulometria, maior é a superfície de reação das partículas do material alcalino e mais rápida é a neutralização inicial dos componentes ácidos do solo. No entanto, a reação mais rápida implica em menor valor residual de neutralização do solo (Tedesco & Gianello, 2000).

Inicialmente ocorre uma superestimação do efeito corretivo dos componentes alcalinizantes dos materiais, conforme foi observado por diversos autores (Kaminski, 1974; Scherer, 1976; Ciprandi, 1993) para calcário e por Segatto (2001) para resíduos de origem industrial. As adições dos RAF's aos três solos também mostraram este efeito (Apêndices 8, 9 e 10), conforme pode ser verificado nas Figuras 21 e 22.

A superestimação do efeito alcalino pode ser devida à presença de componentes alcalinizantes dos corretivos ou dos resíduos, que ainda não foram neutralizados pelos componentes ácidos do solo. Como discutido anteriormente, a própria mineralização da matéria orgânica pode modificar o equilíbrio ácido - base do solo.

Tabela 25. Valores de pH em água (médias de quatro determinações e de três repetições durante o período de 35 a 77 dias)

Tratamento	Solos			Média
	PVAd	PVd	NVdf	
	----- pH em água -----			
RAF P 15	6,3 d	4,5 e	4,7 d	5,2 cd
RAF P 30	7,6 c	5,4 cd	5,1 cd	6,0 bcd
RAF P 60	8,9 ab	6,8 b	5,9 bcd	7,2 abc
RAF P 120	9,1 ab	8,9 a	7,4 a	8,5 a
Testemunha	4,8 e	4,0 e	4,7 d	4,5 d
CaCO ₃ + MgCO ₃	5,8 d	7,3 b	6,9 ab	6,7 abcd
RAF T 15	6,6 d	4,7 de	5,0 cd	5,4 bcd
RAF T 30	8,4 b	5,7 c	5,3 cd	6,5 abcd
RAF T 60	9,4 a	7,4 b	6,3 abc	7,7 ab
RAF T 120	9,4 a	9,1 a	7,4 a	8,6 a

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05)

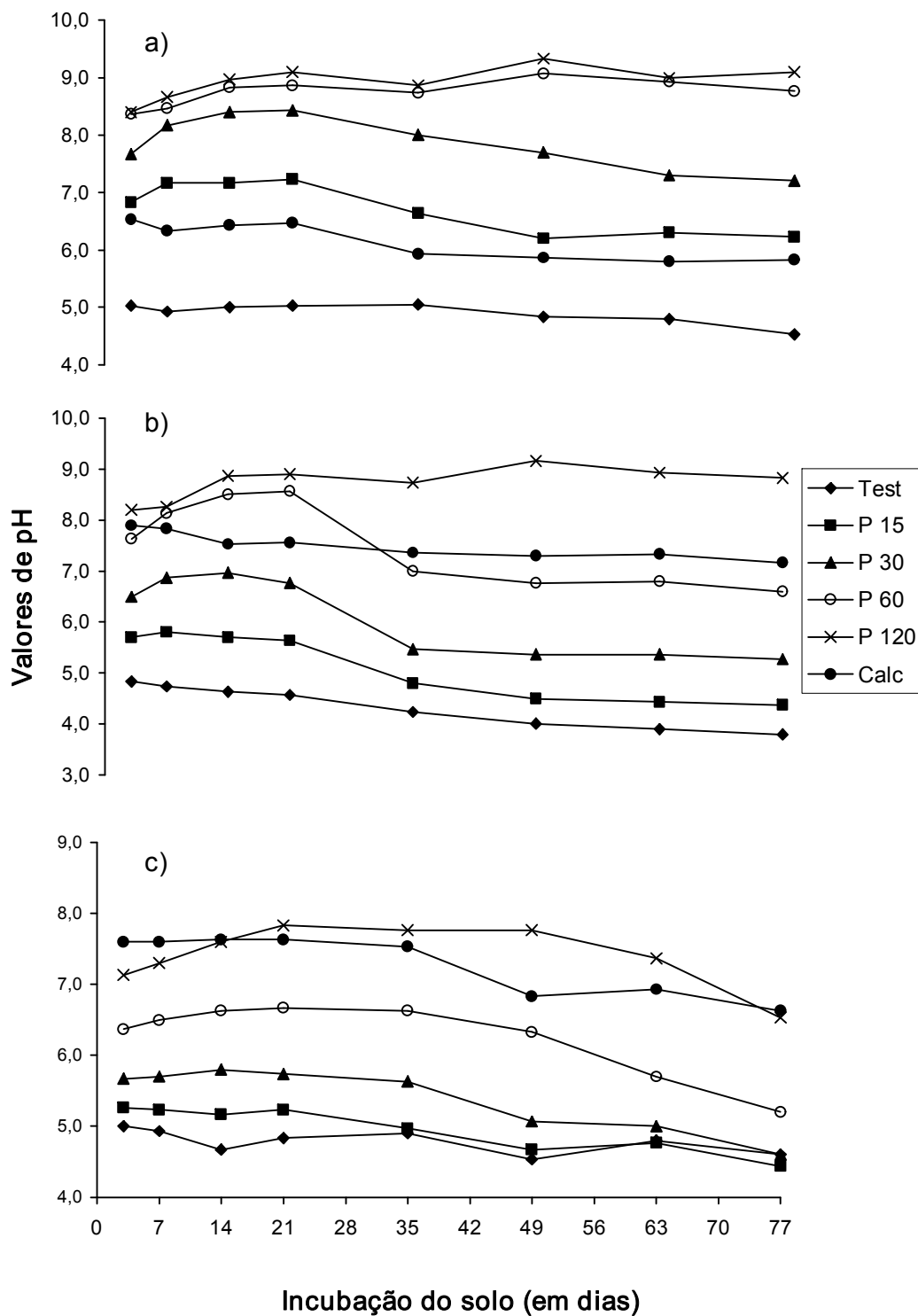


Figura 21. Valores de pH em água determinados (média de 3 repetições) durante o experimento nos solos a) PVA, b) PVd e c) NVdf, nos tratamentos com a adição de RAF P

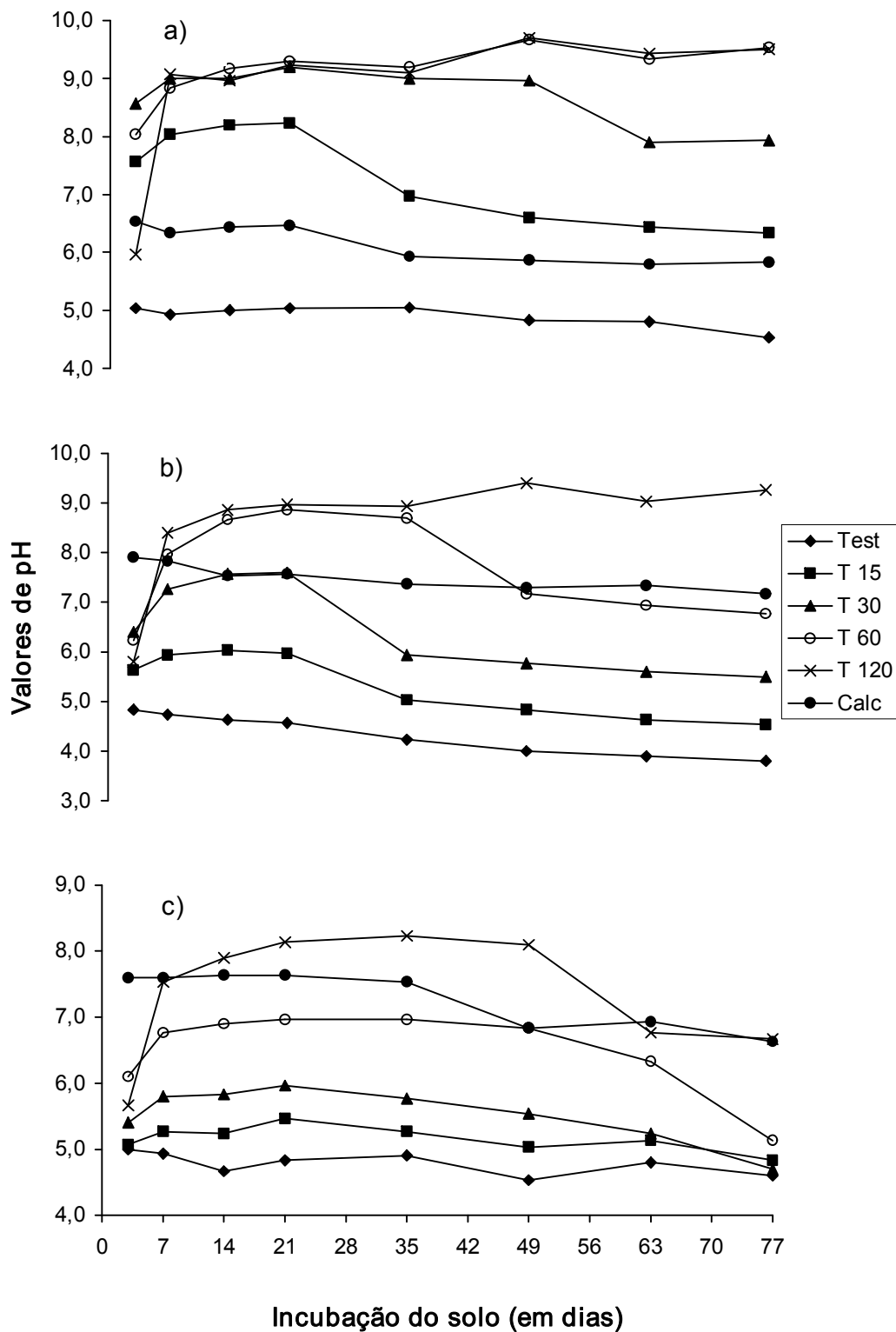


Figura 22. Valores de pH em água determinados (média de 3 repetições) durante o experimento nos solos a) PVA, b) PVd e c) NVdf, nos tratamentos com a adição de RAF T

A partir deste período inicial, o pH do solo apresenta menores variações, com tendência a diminuir em sistemas abertos, devido à nitrificação do amônio produzido durante a mineralização da matéria orgânica do solo (Victoria et al., 1992; Fenton & Helyar, 2002). Em geral, este fato foi observado nos tratamentos testemunha, com calagem e com a adição dos resíduos até a dose de 30 t ha⁻¹ (Apêndices 7, 8 e 9). Nos tratamentos com adição de alta quantidade de resíduos, a nitrificação foi provavelmente inibida no solo PVAd pela elevação excessiva do pH (Figura 5), mantendo-se os valores de pH de equilíbrio em níveis mais elevados. Por outro lado, observa-se que a reacidificação foi maior nos solos com maior poder tampão de acidez (Figuras 21 e 22).

Os resultados obtidos neste experimento serão discutidos, portanto, pelas médias dos valores determinados no período de 35 a 77 dias após o início da incubação (quatro determinações), como sendo os valores de pH (em água) de equilíbrio.

Tabela 26. Equivalência dos resíduos RAF P e RAF T (t ha⁻¹) em relação a 1,0 t ha⁻¹ de carbonato (CaCO₃ + MgCO₃)

Resíduo	Solos			Média	Valor de neutralização (VN) ¹
	PVAd	PVd	NVdf		
	----- Equivalência (t de resíduos) -----				%
RAF P	11,4	15,3	11,1	12,6	7,9
RAF T	9,1	12,4	10,1	10,5	9,5

¹ Calculado sobre a equivalência média nos três solos

Com base nas quantidades de calcário adicionadas, pode-se estabelecer a equivalência dos resíduos em calcário (Tabela 26), que foram, em média, de 10,5 e de 12,6 t ha⁻¹ de RAF P e de RAF T, respectivamente, para uma tonelada ha⁻¹ de carbonato. Estes valores indicam que os resíduos apresentaram um valor de neutralização (média dos três solos) de 7,9% para o RAF P e de 9,5% para o RAF T. Deve-se considerar que os solos apresentam diferente tamponamento da acidez e que as doses de calcário (CaCO₃ + MgCO₃) adicionadas ao solo foram superestimadas nos solos PVd e NVdf, com pH's médios ao final do experimento de 7,3 e 6,9, respectivamente.

A determinação por titulação (ácido-base) direta dos resíduos (Tedesco et al., 1995) apresentou valor de neutralização (VN) de 8,1 para o RAF P e de 0,0 para o RAF T. A discrepância entre valores de VN determinados por incubação dos solos e por titulação, também foi observada em outros resíduos de base orgânica (Segatto, 2001). Este fato pode ser atribuído à menor sensibilidade do método de titulação com ácido forte, o qual neutraliza rapidamente as oxidrilas presentes em materiais minerais. Isto reforça a hipótese da neutralização da acidez mediada por reações microbiológicas dos resíduos no solo, como a amonificação de N e outras capazes de liberar bases orgânicas (R-CO⁻).

Os valores de pH em água dos tratamentos com adição dos RAF's são dados nas Figuras 23, 24 e 25, para os solos PVAd, PVd e NVdf, respectivamente. Pode ser observado que o pH de equilíbrio aumentou com a quantidade dos resíduos adicionada. Entretanto, como pode ser verificado pelas equações quadráticas, o incremento de pH foi menor nos solos com maior poder tampão. O RAF T apresentou, em geral, tendência de maior efeito corretivo em relação ao RAF P.

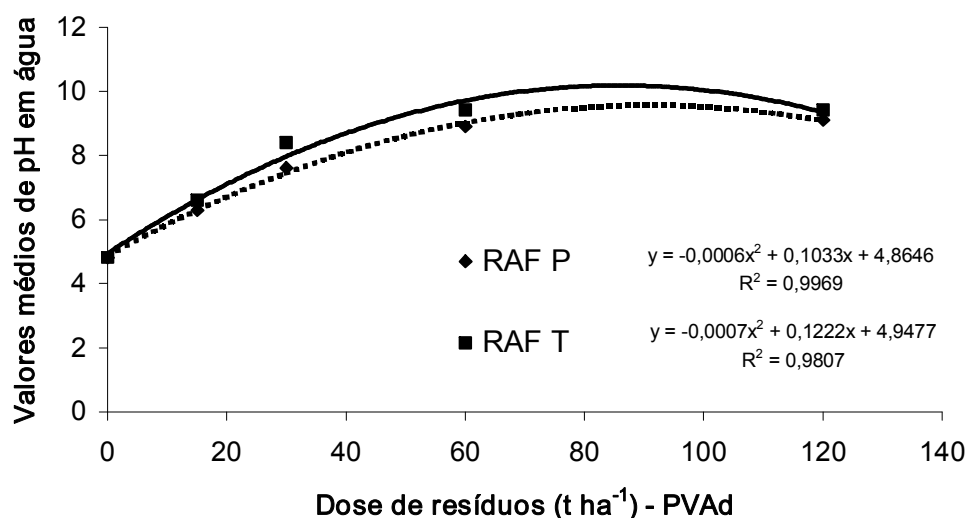


Figura 23. Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo PVAd (Itapoã) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias)

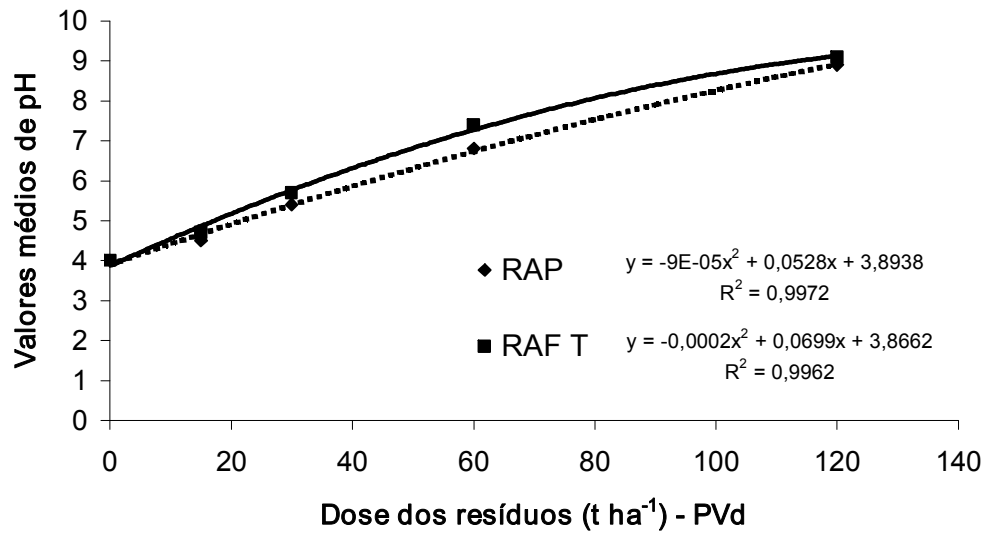


Figura 24. Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo PVd (São Jerônimo) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias)

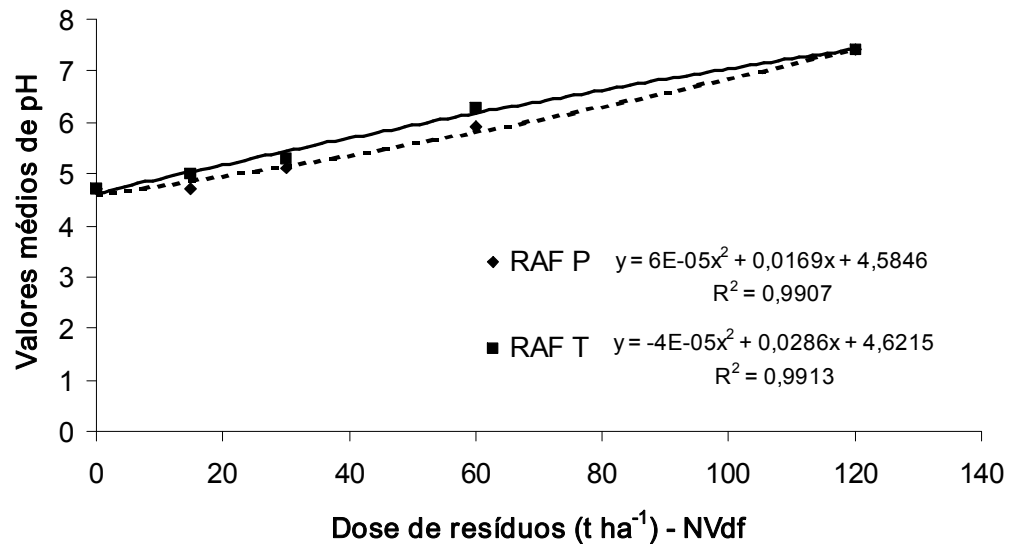


Figura 25. Relação entre a dose de resíduos adicionadas no solo NVdf (Estação) e seu efeito no pH de equilíbrio (média das determinações dos 35 aos 77 dias)

4.3.2. Efeitos da adição dos resíduos na acidez potencial do solo

Os valores de equilíbrio da acidez potencial dos solos determinados pelo índice SMP, calculados conforme a equação proposta por Kaminski et al. (2001), são dados na Tabela 27. Pode-se observar que a acidez potencial dos três solos diminuiu com o aumento das doses dos resíduos adicionadas, à semelhança do que foi observado nos valores de pH em água.

Tabela 27. Acidez potencial (H + Al) determinada pelo índice SMP (médias de quatro determinações e de três repetições durante o período de 35 a 77 dias)

Tratamento	Solos			
	PVAd	PVd	NVdf	Média
	----- cmol _c dm ⁻³ -----			
RAF P 15	1,00 c	3,31 b	5,64 b	3,32 ab
RAF P 30	0,73 b	1,87 c	3,74 cd	2,11 b
RAF P 60	0,58 d	1,07 d	2,15 de	1,27 b
RAF P 120	0,57 d	0,59 d	1,32 e	0,83 b
Testemunha	2,03 a	5,44 a	8,17 a	5,21 a
CaCO ₃ + MgCO ₃	1,28 b	0,93 d	1,36 e	1,19 b
RAF T 15	1,01 c	3,20 b	4,43 bc	2,88 ab
RAF T 30	0,73 d	1,89 c	3,40 cd	2,01 b
RAF T 60	0,58 d	1,04 d	2,18 de	1,27 b
RAF T 120	0,63 d	0,77 d	1,25 e	0,88 b

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05)

6. CONCLUSÕES

1. A atividade microbiana, avaliada pela evolução de CO₂, aumentou nos tratamentos com adição crescente dos resíduos RAF P e RAF T, demonstrando rápida mineralização do carbono dos resíduos no solo PVAd, em média aproximadamente 40% e 49% na dose de 15 t ha⁻¹, respectivamente;
2. Os estudos em ambiente controlado demonstraram excelente potencial de reciclagem agrícola dos resíduos RAF P e RAF T incorporados ao solo, observando-se, em escala variável, aumento no rendimento de matéria seca e a melhoria em atributos de fertilidade do solo;
3. Os rendimentos de MS de milho (parte aérea), determinados com aplicação imediata dos resíduos no solo, apresentaram incremento nos tratamentos com a adição de doses de até 7,5 e de até 15 t ha⁻¹ do RAF T e RAF P, respectivamente;
4. Diferentemente do primeiro cultivo, não foram verificadas diminuições no rendimento de MS de sorgo (parte aérea) nos tratamentos com adição de doses maiores que 15 t ha⁻¹, nos estudos do efeito residual e de reaplicação dos resíduos, observando-se que nitrogênio e o fósforo foram os nutrientes mais limitantes no segundo cultivo;
5. Apesar das perdas de N mineral lixiviado no primeiro cultivo terem sido, em geral, semelhantes em relação ao tratamento testemunha e com a

adubação mineral (NPK), é necessário que seja realizado o monitoramento do lixiviado em doses superiores a 15 t ha^{-1} dos resíduos,

6. Os resíduos RAF P e RAF T apresentaram reação alcalina no solo, variando o valor de neutralização (VN) conforme a dose adicionada e com o poder tampão da acidez dos solos estudados ;
7. Foram observados, em escala variável, aumentos nos teores de matéria orgânica, no pH, na saturação de bases, na capacidade de troca de cátions ($\text{CTC}_{\text{pH } 7,0}$) e na disponibilidade de macronutrientes como N, P, Mg e sobretudo de K e Ca;
8. Para que sejam obtidos dados mais abrangentes e seguros a respeito da máxima eficiência agrônômica e de possíveis restrições ambientais, são necessários estudos de calibração de doses à campo, sob diferentes condições edafo-climáticas e sob diferentes formas de aplicação (incorporada ou em superfície).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, F. Crop response to lime in the Southern United States. In: ADAMS, F. (ed.) **Soil acidity and liming**. Madison: ASA; SSSA; CSSA, 1984. p. 211-266.

AFUBRA. **Perfil da fumicultura no Brasil**. Disponível em: <<http://www.afubra.com.br>>. Acesso em: 25 out. 2004.

AFUBRA **Querem acabar com a fumicultura**. Associação dos Fumicultores do Brasil (AFUBRA) Disponível em: <<http://www.afubra.com.br>>. Acesso em: 20 fev. 2005.

ALEXANDER, M. Sorption. **Biodegradation and biorremediation**. San Diego-CA: Academic Press, 1994. 301 p.

ALISSON, F. E. **The organic matter content of soils**: Soil organic matter and its role in crop production. New York: Elsevier, 1973. p 120-123.

BAYER, C.; MIELCNIZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica no solo:ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 09-23.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Divisão de Pedologia. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30).

CAMARGO, F. A. O.; SÁ, E. L. S., Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J. ; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 93-116.

CASTELLANOS, J. Z.; PRATT, P. F. Mineralization of manure nitrogen and correlation with laboratory indexes. **Soils Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 354-357, 1981.

CETESB. **Aplicação de biossólidos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas**: critérios para projeto e operação. São Paulo:Cetesb, 1999. 33 p.

CIPRANDI, M. A. O. **Avaliação da metodologia de determinação da acidez ativa e potencial em solos do Rio Grande do Sul**. 1993. 90 f. Dissertação

(Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

COMISSÃO de Fertilidade do Solo. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo: SBCS- Núcleo Regional Sul, 1995.

COMISSÃO de Química e Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Núcleo Regional Sul. **Manual de recomendação de adubação e calagem**: para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. 10. ed. Porto Alegre: SBCS- Núcleo Regional Sul, 2004.

CZEKATA, J.; JACUBUS, M.; MOCEK, A.; OWERZAK, W. The utilization of tobacco dust as a source of nitrogen for plants and of carbon for the formation of humus compounds in soil. In: **RECYCLING OF AGRICULTURAL, MUNICIPAL AND INDUSTRIAL RESIDUES IN AGRICULTURE**, 10, 2002, Strbske Plesos, Slovak Republic. **Proceedings...** Strbske Plesos, Slovak Republic, 2002. Disponível em:

<<http://www.ramiran.net/index>>. Acesso em: 23 out. 2004.

DÖBEREINER, J.; ALVAHYDO, R. Eliminação da toxidez de manganês pela matéria orgânica em solo Gray Hidromórfico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, São Paulo, v.1, p. 243-246, 1966.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; GRENNBERG, A. E. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19th ed. Washington, DC: APHA: AWWA: WEF, 1995.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EPSTEIN, D.B.; KEANE, J.J.; LEGG, J.O. Mineralization of nitrogen from sewage sludge compost. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 2, p. 217-221, 1978.

ERNANI, P. R.; GIANELLO, C. Diminuição do alumínio trocável do solo pela incorporação de esterco de bovinos e camas-de-aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 161-165, 1983.

ERNANI, P. R. Necessidade da adição de nitrogênio para o milho em solo fertilizado com esterco de suínos, cama-de-aves e adubos minerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 313-317, 1984.

ERNANI, P. R. **Utilização de materiais orgânicos e adubos minerais na fertilização do solo**. 1981. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

FENTON, G.; HELYAR, K. The causes and management of acid soils. In: **SOILS WORKSHOP: DESCRIBING, ANALYZING AND MANAGING OUR**

SOIL. Sidney: University of Sidney and NSW Branch Soil Science Society, 1999.

FENTON, G.; HELYAR, K. The role of the nitrogen and carbon cycle in soil acidification. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 98, p.1-12, 2002. (Encarte Técnico).

RECOMENDAÇÕES técnicas para a cultura de milho no estado do RS. Porto Alegre: FEPAGRO: EMATER/RS: FECOAGRO/RS, 1998. (Boletim técnico, 5).

FERREIRA, A. C.; ANDREOLI, C. V.; JÜRGENSEN, D. Destino final do lodo. In: ANDREOLI, C.V.; LARA, A. I.; ILHENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: PROSAB: SANEPAR: ABES, 1999^a. p. 27-28.

FERREIRA, A. C., ANDREOLLI, C. V.; LARA, A. I. Riscos associados ao uso do lodo de esgoto In: ANDREOLI, C.V.; LARA, A. I.; ILHENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: PROSAB/SANEPAR/ABES, 1999b. p. 29-33.

GIANELLO, C.; ERNANI, P.R. Rendimento de matéria seca de milho e alterações na composição química do solo pela incorporação de quantidades crescentes de cama de frangos em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 285-290, 1983.

GUENZI, W. D.; BEARD, W. E.; WATANABE, F. S. Nitrification and denitrification in cattle manure amended soil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 7, p. 406-412, 1978.

HOLANDA, J. S.; MIELCNIZUK, J.; STAMMEL, J. G. Utilização de esterco e adubo mineral em quatro seqüências de cultura de solo de Encosta Basáltica do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 47-51, 1982.

ILHENFELD, R. G. K.; PEGORINI, E. S.; ANDREOLI, C. V. Fatores limitantes. In: ANDREOLI, C.V.; LARA, A. I.; ILHENFELD, R. G. K. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Rio de Janeiro: SANEPAR: ABES, 1999. p. 47-63.

KAMINSKI, J. **Fatores de acidez e necessidade de calcário em solos no Estado do Rio Grande do Sul**. 1974. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BARTZ, H. R.; GATIBONI, L. C.; BISSANI, C. A.; ESCOSTEGUY, P. A. V. Proposta de nova equação para determinação do valor de H + Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e SC. In: ATA... Frederico Westphalen, 2001. p. 21-26.

KBH & C **Coordenação de Processos Industriais**. Vera Cruz: KBH & C, 2004. (Comunicado Técnico). Não publicado.

KHATOUNIAN, C. A. **Manejo da fertilidade em sistemas de produção e estratégias de conversão para a agricultura orgânica**. Curso técnico em agropecuária e agroecologia. Curitiba: Emater-PR, 2002.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Ceres, 1985.

KIRST, A. **Avaliação da fertilidade dos solos do município de Santa Cruz do Sul, RS, Brasil**. 2001. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2001.

KRAY, C.H. **Efeitos de duas aplicações de resíduos de curtume e carbonífero no solo e nas plantas**. Santa Cruz do Sul: Unisc, 2001. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LAUSCHNER, M. H.; TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; KRAY, C. H. Valor fertilizante de resíduos orgânicos e adubos minerais em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 26., 2004, Lages. **Anais...** Lages, 2004. CD-ROM.

LUND, Z.F.; DOSS, B. D. Residual effects of dairy cattle manure on plant growth properties. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, p. 123-130, 1980.

MALAVOLTA, E. **Manual de Química Agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Ceres, 1981.

MAPA. **Estatísticas: Comércio exterior brasileiro**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 10 nov. 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Stuttgart-Honenheim: Academic Press, 1986.

MATTIAZO, M.E. Premissas básicas no estudo da possibilidade de uso agrícola de resíduos. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 20., 1996, Águas de Lindóia-SP. **Anais...** Campinas, 1996. CD-ROM.

McCORMICK, R. A.; NELSON, D. W., HUBER, D.M.; SUTTON, A. L. Effect of nitrapyrin on nitrogen transformations in soil treated with liquid swine manure. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 947-950, 1983.

MEURER, E. J.; SELBACH, P.; BISSANI, C.A. Poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. (ed.) **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Genesis, 2000a. p. 151-169.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A. Fenômenos de superfície. In: MEURER, E. J. (ed.) **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2000b. p. 77-108.

MIELCNIZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F.A.O. (ed). **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 01-06.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p. 411-416, 1993.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J.C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações agronômicas**, Piracicaba, n. 92, p. 1-7 (Encarte Técnico), 2000.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2001.

MUGWIRA, I. M. Residual effects of dairy cattle manure on millet and rye forage and soil properties. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 8, p. 251-255, 1979.

MURDOCK, J. T. Importance of soil fertility to agricultural production and the environment. In: GIANELLO C.; VIDOR, C.; MIELNICZUCK, J.; KLAMT, E. (ed.) **Produzir sem degradar**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1993. p.53-82.

MUSUMECI, M.R. Defensivos agrícolas e sua interação com a microbiota do solo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (coord.) **Microbiologia do Solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992.

NAGANAWA, T.; KYUMA, K. H., YAMAMOTO, Y. Measurement of soil respiration in the field: influence of temperature, moisture level and application of sewage sludge compost and agrochemicals. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 35, p. 509-516, 1989.

PAGE, A. L; LUE-HING, C.; CHANG, A.C. **Utilization, treatment and disposal of waste on land**. Madison: Soil Society of America, 1985.

PRIMAVESI, A. Organic matter and soil productivity in the tropics and subtropics. In: PRIMAVESI, A. **Organic matter and soil fertility**. New York: Northland Publ. Co., 1968. p. 596-653.

QMCWEB. Revista eletrônica do departamento de química da UFSC. **Nicotina: a molécula que vicia**. Disponível em:
<<http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/nicotina>>. Acesso em: 10 jan. 2005.

QUADRO, M. S. **Alterações químicas e microbiológicas decorrentes da aplicação de esterco de suíno ao solo**. Pelotas: Ufpel, 2004. 84 f.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2004.

RECOMENDAÇÕES técnicas para a cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: FEPAGRO: EMATER-RS: FECOAGRO-RS, 1998. (Boletim Técnico, 5).

RODRIGUES, A. L. M.; ANGHINONI, M. C. M.; TEDESCO, M. J. et al. Critérios técnicos para a disposição no solo de resíduos sólidos de curtume. In: CONGRESSO DA UNIÃO INTERNACIONAL DOS QUÍMICOS E TÉCNICOS DA INDÚSTRIA DO COURO, 22., 1993, Porto Alegre. **Boletim...** Porto Alegre : FEPAM, 1993.

SANEPAR. **Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no Paraná.** Curitiba: SANEPAR, 1997.

SEGATTO, M. P. **Efeitos da aplicação de resíduos industriais no solo e nas plantas.** 2001. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

SELBACH, P. A.; SÁ, E. L. S., Fertilizantes orgânicos, organo-minerais e agricultura orgânica. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (ed.). **Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas.** Porto Alegre: Genesis, 2004. p. 175-186.

SELBACH, P.A Acidez do solo e atividade microbiana. In: KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S.J.; BECKER, F.C. (coord.) **Corretivos da acidez do solo.** Santa Maria: UFSM, 1989. p. 63-72.

SPARKS, D. L. Sorption phenomena on soils. In: SPARKS, D. L. **Enviromental soil chemistry.** Delaware: University of Delaware, 1995. p. 99-139.

SPOSITO, G. Exchangeable ions. In: SPOSITO, G. **The chemistry of soils.** New York: Oxford University Press, 1989. p. 170-184.

STOTSKY, G. Microbial respiration. In: BLACK, C.A. (ed.) **Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties.** Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 1551-1572.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: EMATER/RS: Departamento de Solos da UFRGS, 2002.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; RIBAS, P.I.F.; CARVALHO, E.B. Long term effects of petrochemical activated sludge on plants and soil: plant growth and metals absorption. IN: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WASTE MANAGEMENT IN THE CHEMICAL AND PETROCHEMICAL INDUSTRIES, 3., Salvador, 1993. **Pré-prints...** Salvador, 1993. p. 371-378.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995.

TEDESCO, M.J.; SELBACH, P.A.; GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O. Resíduos orgânicos no solo e os impactos no ambiente In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F.A.O. (ed.) **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 159-196.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo. In: KAMINSKI, J. (coord.) **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: NRS/SBCS, 2000. p. 95-144. (Boletim Técnico, 4).

TEDESCO, M.J.; BISSANI, C. A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas p. 75-92 In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (ed.) **Fertilidade do solo e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 75-92.

TEIXEIRA, J. R. **Utilização de resíduos sólidos alcalinos de indústrias de celulose na correção da acidez do solo**. 2003. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

TIFAC. Technology Information, Forecasting and Assessment Council. **Nicotine and its derivatives from tobacco waste**. Disponível em: <http://www.tifac.org.in>. Acesso em: 12 jan. 2005.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizers**. 5 th ed. New York: MacMilan Publishing, 1993.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. 2001. 184 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

VICTORIA, R. L.; PICCOLO, M. C.; VARGAS, A.A.T. O ciclo do nitrogênio In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (coord.) **Microbiologia do Solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 102-116.

VOLKWEISS, S. J. Química da acidez do solo In : KAMINSKI, J.; VOLKWEISS, S.J.; BECKER, F.C. (coord.) **Corretivos da acidez do solo**. Santa Maria: UFSM, 1989. p. 07-38.

Apêndice 1. Determinações da produção de C-CO₂ em mg kg solo⁻¹ (média de três repetições) durante a condução do experimento de mineralização dos resíduos

Tratamentos	Dias acumulados								
	1	3	4	6	7	8	9	10	11
	----- C-CO ₂ (mg kg ⁻¹ solo ⁻¹) -----								
Testemunha	28,8	61,5	76,7	90,9	102,7	112,8	126,3	130,6	140,8
RAF P 5	79,8	162,6	194,2	239,0	266,0	289,5	319,8	340,9	362,2
RAF T 5	111,5	227,1	278,3	347,6	389,9	426,2	461,9	492,3	516,6
RAF P 15	119,3	254,8	321,7	440,4	492,3	543,2	601,2	644,0	682,6
RAF T 15	161,1	393,1	492,2	662,5	733,7	802,3	873,9	934,0	986,3
RAF P 15 + NPK	126,5	264,4	324,7	443,0	501,1	554,1	610,6	661,6	707,1
RAF T 15 + NPK	167,5	395,5	505,9	698,5	780,8	858,2	940,5	1010,5	1069,5
RAF P 45	151,1	365,8	469,3	649,4	726,1	800,4	881,6	953,5	1025,5
RAF T 45	123,3	412,2	606,9	960,1	1118,6	1272,6	1425,0	1556,8	1668,5
RAF P 135	169,8	457,7	639,6	945,5	1069,3	1182,1	1298,3	1404,2	1493,9
RAF T 135	46,8	342,0	580,9	1055,4	1291,1	1525,6	1760,8	1978,5	2169,2
Média	125,7	327,5	441,4	644,2	736,9	825,4	917,4	997,6	1068,1

Continua....

Apêndice 1. Continuação...

Dias acumulados	Dias acumulados								
	13	14	17	21	25	28	31	35	37
Testemunha	----- C-CO ₂ (mg kg ⁻¹ solo ⁻¹) -----								
RAF P 5	155,8	165,1	172,0	180,1	188,3	202,2	208,2	216,8	223,9
RAF T 5	382,6	402,8	414,8	437,2	463,2	493,3	511,4	535,3	547,9
RAF P 15	540,2	559,7	575,6	606,5	635,3	667,4	687,6	706,1	715,0
RAF T 15	723,7	759,0	779,8	827,8	870,9	910,8	931,2	960,7	970,6
RAF P 15 + NPK	1032,5	1070,0	1096,7	1151,1	1201,0	1250,8	1282,1	1316,3	1331,1
RAF T 15 + NPK	750,4	784,7	814,8	873,6	928,2	979,5	1009,9	1042,3	1056,7
RAF P 45	1121,4	1163,6	1196,4	1252,5	1303,8	1355,1	1384,5	1418,3	1437,3
RAF T 45	1099,8	1165,1	1232,8	1350,5	1474,8	1600,0	1675,8	1747,8	1776,3
RAF P 135	1768,7	1846,7	1929,2	2082,5	2227,6	2345,0	2421,1	2497,0	2531,1
RAF T 135	1578,5	1651,9	1723,4	1853,7	2005,7	2167,0	2294,2	2414,5	2502,0
Testemunha	2350,0	2493,9	2620,7	2807,5	2987,3	3162,7	3312,3	3458,2	3546,2
Média	1134,8	1189,8	1238,4	1324,3	1409,8	1493,2	1551,0	1609,7	1641,4

Continua....

Apêndice 1. Continuação...

Dias acumulados	Dias acumulados								
	43	47	52	56	59	65	72	79	86
Tratamento	----- C-CO ₂ (mg kg ⁻¹ solo ⁻¹) -----								
Testemunha	242,9	255,1	274,0	291,9	313,4	340,2	379,8	412,9	434,7
RAF P 5	587,1	606,4	625,6	649,3	670,9	691,8	722,8	747,5	767,2
RAF T 5	755,3	781,1	804,0	828,9	843,6	867,8	905,0	929,2	947,5
RAF P 15	1016,9	1043,7	1071,1	1097,9	1118,6	1146,8	1193,5	1233,7	1264,5
RAF T 15	1384,3	1416,3	1448,0	1478,4	1497,3	1526,9	1570,0	1615,8	1640,2
RAF P 15 + NPK	1104,7	1130,9	1157,0	1186,4	1206,7	1232,4	1267,1	1311,8	1334,6
RAF T 15 + NPK	1494,0	1529,9	1567,3	1600,0	1623,8	1656,5	1707,5	1763,4	1792,4
RAF P 45	1870,1	1930,2	1996,6	2051,8	2096,5	2149,8	2220,1	2283,0	2326,6
RAF T 45	2624,7	2685,3	2750,3	2806,5	2847,5	2930,9	3001,4	3062,9	3109,8
RAF P 135	2751,9	2941,3	3125,8	3293,9	3446,0	3620,6	3840,7	4044,2	4197,8
RAF T 135	3805,1	4052,1	4311,8	4562,2	4872,9	5211,6	5587,4	5915,2	6120,6
Média	1739,4	1811,7	1885,7	1955,5	2022,4	2103,5	2201,5	2290,7	2350,1

Continua....

Apêndice 1. Continuação...

Dias acumulados	Dias acumulados						Total acumulado	
	93	100	107	114	121	142		163
Tratamento	----- C-CO ₂ (mg kg ⁻¹ solo ⁻¹) -----							
Testemunha	453,4	470,5	488,4	513,3	523,7	552,7	556,8	556,8 g
RAF P 5	781,4	794,1	809,8	828,2	837,4	859,7	862,5	862,5 fg
RAF T 5	961,5	975,3	985,3	996,5	1008,2	1024,8	1029,8	1029,8 efg
RAF P 15	1291,1	1312,2	1331,4	1354,5	1371,1	1401,8	1409,8	1409,8 efg
RAF T 15	1660,7	1677,4	1697,6	1717,8	1738,4	1777,1	1779,7	1779,7 de
RAF P 15 + NPK	1356,2	1376,6	1400,5	1417,8	1439,7	1482,3	1488,6	1488,6 def
RAF T 15 + NPK	1819,6	1849,3	1885,7	1929,4	1947,3	1987,9	1998,3	1998,3 de
RAF P 45	2367,7	2405,5	2440,4	2484,4	2517,3	2571,7	2579,9	2579,9 cd
RAF T 45	3152,2	3199,2	3242,2	3291,9	3334,2	3396,8	3423,0	3423,0 bc
RAF P 135	4335,4	4460,1	4576,8	4685,3	4771,8	4857,2	4899,0	4899,0 b
RAF T 135	6256,7	6376,6	6476,1	6589,9	6663,0	6742,2	6792,2	6792,2 a
Média	2398,3	2442,7	2484,6	2529,6	2562,8	2610,1	2626,3	2626,3

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Apêndice 2. Rendimento de matéria seca (MS) e teor de macronutrientes no tecido de milho (média de quatro repetições)

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	
	g vaso ⁻¹	----- % -----				
Testemunha	11,0 i	1,54 g	0,11 ef	2,24 jl	0,47 a	0,61 a
NPK	60,9 bcdef	1,98 ef	0,14 def	1,59 lm	0,38 abc	0,56 a
RAF P 7,5	57,5 cdef	1,10 i	0,12 ef	2,86 ij	0,25 defg	0,34 bcdef
RAF T 7,5	54,2 def	1,15 hi	0,10 f	4,09 fgh	0,21 efg	0,30 cdefg
RAF P 15	67,2 bcd	1,65 fg	0,17 cd	4,36 efg	0,30 cde	0,36 bcde
RAF T 15	50,1 efg	2,02 def	0,19 bcd	6,21 ab	0,22 efg	0,26 efg
RAF P 30	56,2 def	2,15 cde	0,23 ab	5,47 bcd	0,26 defg	0,34 bcdef
RAF T 30	36,7 gh	2,37 abcd	0,20 abc	6,73 a	0,16 g	0,24 fg
RAF P 60	38,2 gh	2,71 a	0,20 abc	5,80 abc	0,25 defg	0,32 bcdef
RAF T 60	34,6 gh	2,61 ab	0,20 abc	6,31 ab	0,22 efg	0,30 defg
P 15 + NP	74,6 b	2,15 cde	0,19 bcd	3,22 hij	0,37 abc	0,41 b
P 15 + NK	63,7 bcde	2,11 cde	0,16 cde	3,80 ghi	0,35 bcd	0,34 bcdef
P 15 + PK	72,2 bc	1,48 gh	0,19 bcd	3,42 ghi	0,40 ab	0,40 bc
T 15 + NP	56,5 cdef	2,28 bcde	0,23 ab	5,03 cdef	0,35 bcd	0,39 bcd
T 15 + NK	34,1 h	2,45 abc	0,25 a	5,35 bcde	0,29 cde	0,32 bcdef
T 15 + PK	60,2 bcdef	1,37 ghi	0,18 bcd	4,46 defg	0,21 efg	0,25 fg
CDA 15	97,2 a	0,67 j	0,20 abc	2,21 jl	0,17 fg	0,20 g
VC 20	47,7 fgh	0,62 j	0,17 cd	0,90 m	0,27 def	0,36 bcde

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 3. Disponibilidade de macronutrientes e CTC do solo após o cultivo do milho (média de quatro repetições)

Tratamento	P	K	Ca	Mg	CTC _{pH 7,0}
	----- mg dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		
Testemunha	3,1 f	20,0 h	0,93 h	0,40 g	3,2 e
NPK	6,9 ef	24,0 h	1,80 defg	0,48 fg	3,7 de
RAF P 7,5	3,5 f	43,0 gh	1,85 defg	0,55 efg	3,9 de
RAF T 7,5	3,5 f	134,5 ef	1,43 gh	0,65 cdef	3,8 de
RAF P 15	7,6 def	53,3 fgh	2,45 bcd	0,60 defg	4,3 cd
RAF T 15	10,8 cdef	235,0 cd	1,70 efg	0,85 cd	4,2 cd
RAF P 30	23,3 cd	112,3 fg	2,98 b	0,75 cde	4,9 bc
RAF T 30	26,0 c	413,5 b	2,13 cdefg	1,15 b	5,2 b
RAF P 60	57,8 b	299,8 c	4,38 a	1,43 a	7,4 a
RAF T 60	64,8 cdef	552,0 a	2,95 b	1,65 a	6,8 a
P 15 + NP	18,5 cdef	43,8 gh	2,35 bcde	0,55 efg	4,2 cd
P 15 + NK	10,8 cdef	48,0 gh	2,28 bcdef	0,55 efg	4,2 cd
P 15 + PK	18,3 cdef	64,5 fgh	2,40 bcde	0,63 cdefg	4,2 cd
T 15 + NP	21,8 cde	229,0 cd	1,80 defg	0,80 cde	4,4 bcd
T 15 + NK	13,2 cdef	202,3 de	1,75 defg	0,88 c	4,3 cd
T 15 + PK	21,0 cde	261,5 cd	1,58 fgh	0,83 cd	4,2 cd
CDA 15	175,3 a	80,75 fgh	2,65 bc	0,73 cdef	4,8 bc
Testemunha	12,3 cdef	17,5 h	1,63 fgh	0,55 efg	4,1 cd

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apêndice 4. Volume total, pH, sódio, condutividade elétrica (CE) e teor de macronutrientes no lixiviado durante o cultivo do milho (média de quatro repetições)

Tratamento	Volume	NH ₄	NO ₂ + NO ₃	K	Na	Ca	Mg	pH	CE
	--- mL ---	----- mg L ⁻¹ -----							--- μS ---
Testemunha	3338 cdef	0,21 b	18,34 bcd	2,20 d	8,57 f	11,23 f	2,18 f	7,6 abc	508 fg
NPK	2695 fgh	0,87 b	26,27 abc	2,81 d	15,44 cde	20,11 cdef	4,63 cdef	7,4 cd	894 def
RAF P 7,5	2298 hi	0,63 b	34,46 a	3,06 d	15,45 cde	19,24 def	4,33 cdef	7,6 abc	887 def
RAF T 7,5	2595 gh	0,35 b	16,28 bcd	2,90 d	12,70 def	15,98 def	3,54 def	7,6 abc	675 efg
RAF P 15	2960 defgh	1,90 b	22,25 abcd	4,19 d	19,07 c	27,29 bcd	7,10 bc	7,5 abc	1106 bcd
RAF T 15	3573 abcde	2,17 b	26,22 abc	4,89 d	16,61 cde	21,53 cdef	4,91 cdef	7,6 abc	954 cde
RAF P 30	2940 defgh	2,20 b	25,59 abc	6,67 cd	15,97 cde	26,55 bcd	6,18 bcd	7,7 abc	1055 cde
RAF T 30	4103 abc	7,45 b	30,91 ab	80,80 b	18,04 cd	32,56 bc	7,73 bc	7,8 ab	1485 b
RAF P 60	2613 gh	3,08 b	15,04 cd	4,78 d	15,43 cde	24,76 bcde	5,48 bcde	7,7 abc	935de
RAF T 60	4233 ab	154,79 a	7,82 d	668,08 a	43,67 b	76,12 a	27,34 a	7,4 bcd	5802 a
P 15 + NP	2773 efgh	1,04 b	26,56 abc	3,93 d	20,69 c	28,02 bcd	7,58 bc	7,5 bc	996 cde
P 15 + NK	3488 bcdef	3,35 b	19,68 bcd	8,77 cd	20,30 c	35,22 b	10,44 b	7,4 bcd	1355 bc
P 15 + PK	3013 defgh	1,34 b	27,79 abc	5,53 cd	21,44 c	28,02 bcd	7,84 bc	7,5 bcd	1079 bcde
T 15 + NP	3730 abcd	0,65 b	24,60 abc	5,87 cd	18,63 cd	21,70 cdef	5,31 cdef	7,6 abc	828 defg
T 15 + NK	4380 a	2,17 b	23,76 abc	27,53 c	16,65 cde	26,96 bcd	6,97 cd	7,6 abc	1205 bcd
T 15 + PK	3113 defgh	0,94 b	23,40 abc	6,55 cd	17,42 cde	20,10 cdef	5,25 cdef	7,5 bc	844 defg
CDA 15	3470 bcdef	0,41 b	8,74 d	2,69 d	50,53 a	19,70 cdef	5,23 cdef	7,1 e	1099 bcd
Testemunha	1700 i	0,29 b	19,04 bcd	2,07 d	10,97 ef	12,15 ef	2,86 ef	7,9 a	458 g

Médias acompanhadas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Apêndice 5. Teores de macronutrientes na parte aérea das plantas de sorgo nos tratamentos sob o efeito residual da aplicação e com a reaplicação dos resíduos (médias de duas repetições)

Tratamento	Efeito Residual					Efeito da Reaplicação				
	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
	----- % -----					----- % -----				
Testemunha	2,07 ab	0,15 f	2,09 d	0,60 a	0,52 ab	2,07 a	0,15 e	2,09 efg	0,60 a	0,52 a
NPK	1,95 abc	0,26 bc	2,18 d	0,38 cd	0,39 cd	1,95 a	0,26 bcd	2,18 defg	0,38 b	0,39 b
RAF P 7,5	2,15 ab	0,16 f	3,39 abc	0,50 b	0,44 bc	1,80 ab	0,15 e	2,84 cdef	0,38 b	0,32 bcd
RAF T 7,5	1,46 def	0,15 f	3,88 a	0,23 ef	0,24 ef	1,37 bc	0,15 e	3,97 ab	0,20 de	0,24 cd
RAF P 15	1,49 def	0,17 ef	3,17 abc	0,37 cd	0,33 cde	1,40 bc	0,16 e	2,96 cd	0,33 bc	0,29 bcd
RAF T 15	1,57 cdef	0,18 def	3,71 ab	0,22 ef	0,28 def	1,95 a	0,22 cde	4,09 a	0,21 de	0,29 bcd
RAF P 30	1,62 cde	0,21 cdef	3,12 abc	0,35 cd	0,30 def	1,95 a	0,25 cd	3,54 abc	0,41 b	0,34 bcd
RAF T 30	1,86 bcd	0,25 bcd	3,83 a	0,20 f	0,31 def	1,94 a	0,24 cd	4,16 a	0,21 de	0,29 bcd
RAF P 60	2,35 a	0,24 bcd	3,13 abc	0,37 cd	0,33 cde	2,05 a	0,25 cd	3,18 bc	0,36 b	0,34 bcd
RAF T 60	1,94 abc	0,15 f	3,40 abc	0,22 ef	0,28 def	2,06 a	0,21 cde	3,82 ab	0,14 e	0,25 bcd
P 15 + NP	2,17 ab	0,26 bcd	1,87 d	0,48 b	0,44 bc	1,98 a	0,26 bcd	1,79 d	0,41 b	0,38 bc
P 15 + NK	2,07 ab	0,15 f	2,93 bc	0,34 cd	0,25 ef	2,29 a	0,22 cde	3,18 bc	0,38 b	0,29 bcd
P 15 + PK	1,29 efg	0,38 a	3,17 abc	0,32 de	0,29 def	1,13 c	0,33 b	2,88 cdef	0,32 bc	0,28 bcd
T 15 + NP	1,18 fg	0,26 bcd	3,30 abc	0,20 f	0,30 def	2,30 a	0,29 bc	3,61 abc	0,22 de	0,35 bcd
T 15 + NK	2,16 ab	0,18 def	3,58 abc	0,22 ef	0,29 def	2,07 a	0,18 de	3,42 abc	0,24 cd	0,36 bcd
T 15 + PK	0,95 g	0,29 b	2,92 b	0,14 f	0,20 f	1,14 c	0,27 bcd	2,90 cde	0,14 e	0,22 d
CDA 15	1,02 g	0,42 a	1,83 d	0,44 bc	0,56 a	1,19 c	0,42 a	2,07 fg	0,34 bc	0,37 bc

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$)

Apêndice 6 - Teores de macronutrientes nas amostras de solo dos tratamentos de reaplicação e residual dos RAF's, coletadas após o segundo cultivo (sorgo)

Tratamento	Efeito Residual				Efeito da Reaplicação			
	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg
	----- g dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----		----- g dm ⁻³ -----		----- cmol _c dm ⁻³ -----	
Testemunha	6,5 d	16,3 h	0,6 g	0,4 de	6,5 h	16,3 i	0,6 g	0,4 h
NPK	-----	-----	2,0 cde	0,5 cde	45,8 de	26,8 hi	2,0 def	0,5 gh
RAF P 7,5	7,5 d	38,0 fgh	1,8 def	0,6 cde	7,6 h	42,5 ghi	1,7 ef	0,6 fgh
RAF T 7,5	6,0 d	85,5 cde	1,4 f	0,6 cde	6,9 h	108,5 de	1,5 efg	0,8 ef
RAF P 15	6,9 d	64,5 defg	1,9 cdef	0,6 cde	6,0 h	85,5 ef	1,4 fg	0,6 fgh
RAF T 15	11,5 d	128,0 ab	1,7 def	0,9 abc	14,5 gh	145,0 bc	1,7 ef	1,0 d
RAF P 30	23,0 d	61,0 defg	3,1 b	0,6 cde	27,5 f	64,5 fg	3,6 b	0,6 efg
RAF T 30	26,0 cd	163,0 a	2,1 cd	1,1 a	32,0 f	170,0 b	2,4 d	1,3 c
RAF P 60	59,5 ab	96,0 bcd	4,3 a	1,0 ab	69,5 c	125,0 cd	4,9 a	1,1 d
RAF T 60	64,5 ab	124,0 abc	3,1 b	1,2 a	78,5 b	213,5 a	3,5 b	1,6 b
P 15 + NP	50,0 ab	26,5 gh	1,9 cdef	0,4 de	46,5 de	28,5 hi	2,2 de	0,4 h
P 15 + NK	13,9 d	35,5 fgh	1,9 cdef	0,3 e	13,0 h	45,0 ghi	2,2 de	0,4 h
P 15 + PK	47,5 bc	50,5 efgh	2,4 c	0,4 de	48,5 d	52,5 gh	2,6 cd	0,5 gh
T 15 + NP	49,5 ab	72,0 def	1,8 def	0,6 cde	41,5 e	86,5 ef	1,9 def	0,8 e
T 15 + NK	15,5 d	61,5 defg	1,5 ef	0,5 de	19,0 g	82,5 ef	1,9 def	0,7 efg
T 15 + PK	53,5 ab	162,5 a	2,0 cde	0,7 bcd	46,0 de	147,5 bc	2,2 de	0,8 e
CDA 15	72,5 a	53,5 efgh	2,9 b	0,7 bcd	100,0 a	85,0 ef	3,1 bc	0,8 ef
Testemunha	21,5 d	16,5 h	1,5 ef	1,0 ab	32,0 f	18,5 i	1,9 def	1,9 a

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan ($p < 0,05$)

Apêndice 7. Valores de pH em água (1:1) no solo PVAd durante a condução do Experimento III (médias de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
RAF P 15	6,8	7,2	7,2	7,2	7,1 bc	6,6	6,2	6,3	6,2	6,2 d
RAF P 30	7,7	8,2	8,4	8,4	8,2 ab	8,0	7,7	7,3	7,2	7,2 c
RAF P 60	8,4	8,5	8,8	8,9	8,7 a	8,7	9,1	8,9	8,8	8,8 ab
RAF P 120	8,4	8,7	9,0	9,1	8,8 a	8,9	9,3	9,0	9,1	9,1 ab
Testemunha	5,0	4,9	5,0	5,0	5,0 d	5,1	4,8	4,8	4,5	4,5 e
Calcário	6,5	6,3	6,4	6,5	6,4 c	5,9	5,9	5,8	5,8	5,8 d
RAF T 15	7,6	8,0	8,2	8,2	8,0 ab	7,0	6,6	6,4	6,3	6,3 d
RAF T 30	8,6	9,0	9,0	9,2	9,0 a	9,0	9,0	7,9	7,9	7,9 b
RAF T 60	8,0	8,8	9,2	9,3	8,8 a	9,2	9,7	9,3	9,5	9,5 a
RAF T 120	6,0	9,1	9,0	9,2	8,3 ab	9,1	9,7	9,4	9,5	9,5 a

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Apêndice 8. Valores de pH em água (1:1) no solo PVd durante a condução do Experimento III (média de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
RAF P 15	5,7	5,8	5,7	5,6	5,7 cd	4,8	4,5	4,4	4,4	4,5 e
RAF P 30	6,5	6,9	7,0	6,8	6,8 bc	5,5	5,4	5,4	5,3	5,4 cd
RAF P 60	7,6	8,1	8,5	8,6	8,2 ab	7,0	6,8	6,8	6,6	6,8 b
RAF P 120	8,2	8,3	8,9	8,9	8,6 a	8,7	9,2	8,9	8,8	8,9 a
Testemunha	4,8	4,7	4,6	4,6	4,7 d	4,2	4,0	3,9	3,8	4,0 e
Calcário	7,9	7,8	7,5	7,6	7,7 ab	7,4	7,3	7,3	7,2	7,3 b
RAF T 15	5,6	5,9	6,0	6,0	5,9 cd	5,0	4,8	4,6	4,5	4,7 de
RAF T 30	6,4	7,3	7,6	7,6	7,2 abc	5,9	5,8	5,6	5,5	5,7 c
RAF T 60	6,2	8,0	8,7	8,9	8,0 ab	8,7	7,2	6,9	6,8	7,4 b
RAF T 120	5,8	8,4	8,9	9,0	8,0 ab	8,9	9,4	9,0	9,3	9,2 a

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Apêndice 9. Valores de pH em água (1:1) no solo NVdf durante a condução do Experimento III (média de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
RAF P 15	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2 e	5,0	4,7	4,8	4,4	4,7 d
RAF P 30	5,7	5,7	5,8	5,7	5,7 de	5,6	5,1	5,0	4,6	5,1 cd
RAF P 60	6,4	6,5	6,6	6,7	6,6 bcd	6,6	6,3	5,7	5,2	6,0 bcd
RAF P 120	7,1	7,3	7,6	7,8	7,5 ab	7,8	7,8	7,4	6,5	7,4 a
Testemunha	5,0	4,9	4,7	4,8	4,9 e	4,9	4,5	4,8	4,6	4,7 d
Calcário	7,6	7,6	7,6	7,6	7,6 a	7,5	6,8	6,9	6,6	7,0 ab
RAF T 15	5,1	5,3	5,2	5,5	5,3 e	5,3	5,0	5,1	4,8	5,1 cd
RAF T 30	5,4	5,8	5,8	6,0	5,8 cde	5,8	5,5	5,2	4,7	5,3 cd
RAF T 60	6,1	6,8	6,9	7,0	6,7 abc	7,0	6,8	6,3	5,1	6,3 abc
RAF T 120	5,7	7,5	7,9	8,1	7,3 ab	8,2	8,1	6,8	6,7	7,5 a

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

Apêndice 10. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo PVAd (médias de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
----- cmol _c dm ⁻³ -----										
RAF P 15	0,94	0,94	0,94	1,02	1,0 bc	1,10	1,04	0,98	0,98	1,0 c
RAF P 30	0,84	0,69	0,62	0,64	0,7 cd	0,75	0,72	0,69	0,75	0,7 d
RAF P 60	0,67	0,69	0,55	0,60	0,6 de	0,67	0,58	0,51	0,55	0,6 e
RAF P 120	0,62	0,55	0,55	0,57	0,6 de	0,69	0,58	0,49	0,51	0,6 e
Testemunha	2,19	2,03	2,03	1,95	2,1 a	2,07	1,95	2,03	2,11	2,0 a
Calcário	1,06	1,14	1,14	1,28	1,2 b	1,38	1,33	1,19	1,23	1,3 b
RAF T 15	0,91	0,84	0,81	0,84	0,9 cd	0,98	1,10	0,98	0,98	1,0 c
RAF T 30	0,67	0,69	0,62	0,64	0,7 de	0,69	0,81	0,72	0,69	0,7 d
RAF T 60	0,74	0,69	0,62	0,64	0,7 de	0,69	0,64	0,49	0,51	0,6 e
RAF T 120	1,61	0,62	0,60	0,67	0,9 cd	0,67	0,60	0,64	0,57	0,6 e

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Apêndice 11. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo PVd (médias de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
----- cmol _c dm ⁻³ -----										
RAF P 15	2,11	2,19	1,95	1,76	2,0 bc	3,60	3,21	3,09	3,34	3,3 b
RAF P 30	1,55	1,28	1,19	1,09	1,3 de	2,03	2,03	1,61	1,81	1,9 c
RAF P 60	0,94	0,75	0,64	0,77	0,8 e	1,10	1,23	0,91	1,06	1,1 d
RAF P 120	0,72	0,75	0,60	0,69	0,7 e	0,69	0,64	0,49	0,53	0,6 e
Testemunha	4,20	5,08	5,28	5,08	4,9 a	5,28	5,70	5,28	5,49	5,4 a
Calcário	0,98	0,87	0,87	0,91	0,9 e	0,98	1,02	0,87	0,87	0,9 de
RAF T 15	2,75	2,55	2,27	2,52	2,5 b	3,60	3,47	2,65	3,09	3,2 b
RAF T 30	2,03	1,67	1,10	1,55	1,6 cd	1,74	2,27	1,61	1,95	1,9 c
RAF T 60	1,95	1,02	0,75	0,74	1,1 de	0,72	1,44	0,98	1,02	1,0 d
RAF T 120	2,46	0,75	0,78	0,79	1,2 de	0,81	0,94	0,69	0,64	0,8 de

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05)

Apêndice 12. Acidez potencial (H+Al) estimada pelo método SMP no solo NVdf (médias de três repetições)

Tratamento	Dias após início do experimento				Média	Dias após início do experimento				Média
	3	7	14	21		35	49	63	77	
----- cmol _c dm ⁻³ -----										
P 15	2,19	4,71	3,89	4,04	3,7 ab	5,92	6,64	4,53	5,49	5,6 b
P 30	2,27	3,09	2,75	2,86	2,7 b	3,09	4,53	3,47	3,89	3,7 cd
P 60	1,95	2,03	1,81	2,11	2,0 b	1,81	2,11	1,95	2,75	2,2 e
P 120	1,28	1,33	1,02	1,06	1,2 b	1,02	1,55	1,33	1,38	1,3 e
Testemunha	4,20	5,92	6,64	6,64	5,9 a	6,90	8,04	8,36	9,38	8,2 a
Calcário	1,14	1,23	1,14	1,19	1,2 b	1,23	1,49	1,38	1,33	1,4 e
T 15	4,20	4,20	3,60	4,04	4,0 ab	3,34	5,92	4,36	4,20	4,5 c
T 30	2,86	3,89	2,86	3,34	3,2 b	2,75	4,04	3,34	3,47	3,4 d
T 60	2,19	1,95	1,55	1,49	1,8 b	1,74	2,46	1,88	2,65	2,2 e
T 120	2,97	1,23	0,94	1,10	1,6 b	0,91	1,44	1,23	1,44	1,3 e

Médias seguidas por letras iguais na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p < 0,05)

