

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
Programa de Pós-Graduação em Manejo e
Conservação do Solo e da Água



Dissertação

**Cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto como
fertilizantes**

Jéssica Pedroso Rosado

Pelotas, 2016

JÉSSICA PEDROSO ROSADO

Cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto como fertilizantes

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Manejo e Conservação do Solo e da Água).

Orientador: Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

Co-orientador: Prof. Dr. Danilo Dufech Castilhos

Pelotas, 2016

Banca examinadora:

Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Prof. Dr. Ezequiel Cesar Carvalho Miola
Universidade Federal de Rio Grande - FURG

Dra. Juliana Silva Teixeira
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa (Suplente)
Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

- A todos que estiveram presente me ajudando e apoiando nesta etapa de minha vida.

Dedico

AGRADECIMENTOS

- À Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade de realizar este curso de pós-graduação.
- Ao Professor Dr. Ledemar Carlos Vahl pela orientação, ensinamentos e dedicação durante a realização deste trabalho, sem as quais esta dissertação não teria se concretizado.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa, através da concessão da bolsa de estudos.
- A todos os professores e funcionários do Departamento de Solos FAEM/UFPEL, que participaram da minha formação científica e pelo excelente ambiente de trabalho durante o curso de pós-graduação.
- Aos colegas do Departamento de Solos, pelos momentos de aprendizado, descontração e alegria.

RESUMO

ROSADO, Jéssica Pedroso. **Cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto como fertilizantes**. 2016. 69 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

O uso de resíduos como fertilizante tais como cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) podem contribuir no fornecimento de nutrientes e reduzir custos de produção. Nesse sentido esta pesquisa objetivou avaliar o LETE como complemento da CCA no fornecimento de nutrientes para o milho e conseqüentemente no desenvolvimento das plantas. O experimento foi realizado em casa de vegetação de setembro a novembro. Adotou-se o delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 6 x 6, tendo no primeiro fator as doses de CCA: 0; 4; 8; 16; 32; 64 g kg⁻¹ e no segundo as doses de LETE: 0; 2; 4; 8; 16; 32 g kg⁻¹, com três repetições. As unidades experimentais foram constituídas de vasos plásticos com 12 dm³ de terra de um Argissolo Vermelho – Amarelo Eutrófico coletado no Centro Agropecuário da Palma-UFPEL, Capão do Leão, RS. Ao final do experimento, com setenta e sete dias, toda a parte aérea do milho foi colhida para quantificar a produção de massa seca e analisar macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn). Os atributos químicos analisados no solo foram: pH em água, teores de cátions trocáveis (Ca, Mg, K e Na), teores de C, N, P, Si, Fe, Mn, Zn e Cu, bem como, a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7. Os resultados indicaram que a CCA atuou na correção da acidez do solo, além de contribuir para o crescimento das plantas, se mostrando eficiente como fonte de fósforo e potássio. O uso do LETE contribui no suprimento de nitrogênio e fósforo, proporcionando o aumento da produção de matéria seca das plantas. Com o LETE houve aumento do Zn e Cu, enquanto que a CCA diminuiu a disponibilidade dos mesmos. Embora o LETE possa de fato suprir o N, carente na CCA, ela supre também o P, de modo que, pelo menos em solo bem suprido de K, não há vantagem em misturar CCA ao LETE para suprir estes macronutrientes, ou seja, aquilo que se busca completar na CCA usando o LETE pode ser atendido, mas ao usar o LETE a CCA pode ser dispensada.

Palavras-chave: resíduos orgânicos, fertilidade, ciclagem de nutrientes.

ABSTRACT

ROSADO, Jéssica Pedroso. **Ash of rice husk and sludge sewage treatment plant as fertilizer.** 2016. 69 p. Dissertation (Master's) – Post-Graduation Program in Management and Conservation of Soil and Water. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

The use of waste as fertilizer such as rice husk ash and sewage sludge treatment plant can contribute to the nutrient supply and reduce production costs. In this sense, this research aimed to evaluate the sewage sludge as the rice husk ash complement the supply of nutrients to corn and consequently in plant development. The experiment was carried out in September - November greenhouse. The design was adopted in randomized blocks in a factorial 6 x 6, with the first factor doses of rice husk ash: 0, 4, 8, 16, 32 and 64 g kg⁻¹ and second doses of sewage sludge: 0; 2; 4; 8; 16; 32 g/kg, with three replications. The experimental units consisted of plastic pots with 12dm³ land Red-Yellow Pozolic soil (Ultisol). At the end of the experiment, seventy-seven days all aerial parts of the corn was harvested to quantify the dry matter yield and analyze macro (N, P, K, Ca and Mg) and micronutrients (Fe, Mn, Cu and Zn). Chemical characteristics analyzed in the soil were pH in water exchangeable cations (Ca, Mg, K and Na) contents of C, N, P, Si, Fe, Mn, Zn and Cu, as well as the ability to cation exchange (CTC) at pH 7. The results indicated that the rice husk ash acted to correct soil acidity and contributes to plant growth, proving efficient and phosphorus and potassium source. The use of sewage sludge contributes to the supply of nitrogen and phosphorus, providing increased production of dry matter of the plants. With sewage, sludge was increased Zn and Cu, while rice husk ash decreased availability. Although milk may in fact supply the N, lacking the CCA, it also supplies the P, so that at least well supplied ground K, there is no advantage to mix CCA to LETE to meet these macronutrients, namely that we are seeking to complete the CCA using LETE can be served, but to use the LETE CCA may be waived.

Key words: organic waste, fertility, nutrient cycling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Constituição do grão de arroz, (Josapar, 2008).	16
Figura 2 - Diagrama de aplicação da casca de arroz e cinza da casca de arroz resultantes do beneficiamento, adaptado de Della et al. (2001).	18
Figura 3 - Diagrama de aplicação de lodo estação de tratamento de esgoto, adaptado de Godoy (2013).	21
Figura 4 - Variação do pH em água no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	28
Figura 5 - Variação da CTC pH ₇ do solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	32
Figura 6 - Saturação de Base (V%) (a, b) e Saturação do Alumínio (m%) (c, d) do solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE), respectivamente. **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	33
Figura 7 - Teores médios de P no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	34
Figura 8 - Teores médios de Si no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	35
Figura 9 - Variação dos teores de Nitrogênio (N) mineral (a) e Carbono orgânico (Corg) (b) no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	37
Figura 10 - Teores do Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu) do solo extraíveis com Mehlich-1 em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a,	

c, e) lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b, d, f). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F. ...	38
Figura 11 - Produção da massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	40
Figura 12 - Dose máxima de eficiência técnica (DMET) da CCA em função da dose de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.	40
Figura 13 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Nitrogênio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	42
Figura 14 – Sintomas de deficiência de nitrogênio nas plantas de milho que receberam dose zero de LETE e 64 g/kg de cinza de casca de arroz (CCA).	42
Figura 15 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Fósforo na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	43
Figura 16 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Potássio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	45
Figura 17 - Concentração (a) e acúmulo (b) de Cálcio e Magnésio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	46
Figura 18 - Concentração (a) e acúmulo (b) de Cálcio e Magnésio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	47
Figura 19 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Zinco (Zn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA).	

**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	47
Figura 20 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Zinco (Zn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.	48
Figura 21 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Ferro (Fe) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F. ...	49
Figura 22 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Manganês (Mn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F. ...	50
Figura 23 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Cobre (Cu) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F. ...	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de produção anual de cinza de casca de arroz no Brasil	17
Tabela 2 - Composição química dos teores totais dos elementos da cinza de casca de arroz (CCA) e do lodo de tratamento de esgoto (LETE).....	24
Tabela 3 - Teores médios dos cátions trocáveis e acidez titulável no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE)	31

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
2.1	Beneficiamento do arroz	15
2.2	Casca de arroz.....	15
2.3	Cinza de casca de arroz	17
2.4	Uso agrícola da cinza de casca de arroz	18
2.5	Lodo de estação de tratamento de esgoto.....	19
2.6	Uso agrícola do lodo de estação de tratamento de esgoto.....	21
3.	MATERIAL E MÉTODOS	24
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	27
4.1	Efeitos da CCA e do LETE nos atributos químicos do solo	27
4.1.1	pH em água	27
4.1.2	Cátions trocáveis e acidez titulável no solo	28
4.1.3	Capacidade de troca de cátions e saturação de bases e de alumínio	32
4.1.4	Fósforo e silício do solo	34
4.1.5	Nitrogênio e carbono orgânico do solo	35
4.1.6	Teores de ferro, manganês, cobre e zinco no solo.....	37
4.2	Produção de massa seca da parte aérea das plantas (MSPA)	39
4.3	Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio nas plantas.....	40
4.4	Teor e acúmulo de cálcio e magnésio nas plantas	45
4.5	Teor e acúmulo de ferro, manganês, cobre e zinco nas plantas	47
5.	CONCLUSÕES.....	53
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
	APÊNDICE	64

1. INTRODUÇÃO

A viabilidade do uso de resíduos tais como cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto na agricultura estão relacionados com a origem do resíduo e das características químicas como disponibilidade de nutrientes, podendo se tornar relevante do ponto de vista econômico e ambiental.

Do processo de beneficiamento de arroz tem-se como resíduo a casca de arroz, que devido ao seu alto poder calorífico e custo praticamente nulo, vêm cada vez mais substituindo a lenha empregada na geração de calor e de vapor, necessários para os processos de secagem e parboilização dos grãos. Com a queima da casca de arroz é produzida a cinza de casca de arroz (CCA) (DELLA et al., 2001).

A cinza é considerada um resíduo industrial sem destinação certa, sendo simplesmente descartada ou lançada em aterros o que gera um problema ambiental de poluição do solo, do ar, de rios e córregos (POUEY, 2006). Quando aplicada corretamente no solo, pode atuar na redução da acidez devido seu alto pH (GAVIOLLI et al., 2007; ISLABÃO et al., 2013; NOLLA et al., 2010; PINTO et al., 2009), na estrutura do solo (ISLABÃO, 2013), e no suprimento de nutrientes e no desenvolvimento das culturas (SANTIN; VAHL, 1985; DONEGA et al., 2007; SILVA et al., 2008, PALMA et al., 2008).

A composição química da cinza de casca de arroz é bastante variável e está relacionada diretamente com o tipo de material que foi queimado. A combustão da casca gera 20 % de cinza com elevada concentração de sílica (85 a 95 %) (REGO, 2001) e teores variados de potássio, fósforo, cálcio e micronutrientes (ISLABÃO, 2013; SANDRINI, 2010).

De acordo com dados obtidos num experimento de campo por Islabão (2013) a CCA, apesar de ter atuado como corretivo de acidez e como excelente fonte de fósforo, potássio e silício para as plantas e melhorado a estrutura do solo, não contribuiu com nitrogênio (N) para as plantas nem carbono orgânico (Corg) para o solo. A ausência de efeito no N e Corg é decorrente dos baixos teores destes na CCA, em virtude da queima. Assim, este material quando usado como fertilizante necessita ser complementado com uma fonte de nitrogênio.

Por outro lado, o lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) é um resíduo rico em matéria orgânica e contém elevados teores de nutrientes, especialmente nitrogênio (BETTIOL; CAMARGO, 2006), além de atuar como condicionador do solo,

melhorando a sua estrutura, como demonstram os resultados de vários trabalhos realizados, entre os quais Trannin (2007) e Sampaio (2012).

Em função disso, pode-se levantar a hipótese de que o LETE pode ser um complemento da CCA como fonte de nitrogênio. Entretanto, outros nutrientes minerais estão presentes na composição dos dois resíduos, tais como fósforo, potássio, cálcio, magnésio e todos os micronutrientes, e ambos podem ser fontes de todos estes nutrientes para as plantas. Além disso, a CCA pode alterar a mineralização do N orgânico do LETE e, portanto, o suprimento deste nutriente para as plantas, e as dosagens de lodo mais adequadas quando aplicada isoladamente podem não ser as mais adequadas quando aplicada junto com a CCA.

Assim o objetivo desse trabalho foi avaliar a contribuição do LETE na disponibilidade de nitrogênio e outros nutrientes para as plantas, como complemento à cinza de casca de arroz.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Beneficiamento do arroz

O cultivo do arroz é uma das atividades agrícolas mais importantes do mundo, sendo considerado um dos cereais de maior valor econômico e fonte de alimento básico de mais da metade da população mundial. O Brasil é o 9º produtor mundial, com uma produção de 12.500.000 toneladas, conforme os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2014), sendo o maior produtor do bloco do MERCOSUL.

O cereal é produzido em todo território nacional, entretanto a produção está concentrada principalmente na região sul e centro-oeste. O Rio Grande do Sul é o principal estado produtor de arroz do país com 69,2 % do total nacional (IBGE, 2013). Essa consolidação favoreceu o estabelecimento de indústrias ligadas ao setor no Estado, especialmente as de beneficiamento do cereal (AYRES et al., 2010).

Segundo Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA) em 2008, o Estado do Rio Grande do Sul possuía cadastrados 267 indústrias de beneficiamento de arroz em funcionamento, distribuídas conforme os dados a seguir: região com maior número de empresas de beneficiamento é a Depressão Central (25,84 %), seguida pela Fronteira Oeste (17,23 %), Planície Costeira Interna (15,37 %), Planície Costeira Externa (13,48 %); Zona Sul (13,48 %) e Campanha (10,11 %).

Na Zona Sul do estado, Pelotas é o município com maior aglomeração de indústrias de beneficiamento de arroz, com um total de 28 empresas (AYRES et al., 2010), o que justifica um grande volume de arroz processado. No processo de beneficiamento do cereal, são gerados produtos como o grão, o farelo, a casca de arroz e a cinza de casca de arroz (DELLA; KUHN; HOTZA, 2005).

2.2 Casca de arroz

Durante o crescimento do arroz, há a formação da casca de arroz como revestimento ou capa protetora dos grãos, conforme observado na Figura 1 que apresenta a estrutura do cereal (KIELING, 2009).

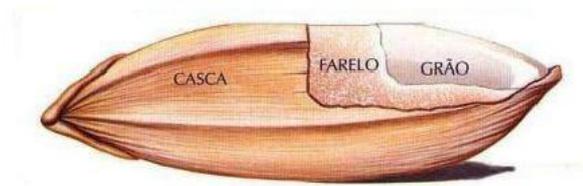


Figura 1- Constituição do grão de arroz, (Josapar, 2008).

Dentre as primeiras operações de beneficiamento do grão, obtém-se a casca como o principal subproduto (HOFFMANN et al., 2007), representando 23 % do grão.

A composição da casca de arroz pode apresentar variações, devido alguns fatores como safra, cultivar, clima e condições do solo (AMICK, 1982; HOUSTON, 1972). De um modo geral, em sua composição encontram-se teores variados de silício, potássio, fósforo, cálcio, e pequenas quantidades de nitrogênio (SILVA et al., 2013).

Por se tratar de um material fibroso composto principalmente por celulose e lignina, a casca apresenta uma lenta biodegradação, permanecendo inalterada por longos períodos de tempo no solo (DELLA; KUHN; HOTZA, 2005), tornando-se uma fonte de poluição. Entretanto, algumas aplicabilidades da casca de arroz podem ser alternativas para minimizar o descarte deste resíduo no meio ambiente.

A geração de energia com o uso da casca de arroz é um bom exemplo. Com a evolução tecnológica do beneficiamento do arroz, a casca tem substituído a lenha na geração de calor e vapor para processos agroindustriais, por apresentar alto poder calorífico ($16.720 \text{ kJ kg}^{-1}$) e custo praticamente nulo para as empresas de beneficiamento (NOLLA et al., 2010).

Os benefícios de utilizar a casca de arroz fez com que, atualmente, várias indústrias no Brasil adotassem centrais termoeletricas que utilizam o resíduo como combustível para geração de energia. Nessas circunstâncias, haverá uma contribuição para o aumento da produção de cinza de casca de arroz, potencial este que pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Potencial de produção anual de cinza de casca de arroz no Brasil

Material	Produção
	X 10⁶ Mg ano⁻¹
Arroz em casca ¹	12,5
Casca de arroz no beneficiamento ²	2,8
Cinza de casca de arroz na queima de casca ³	0,57

Fontes: Adaptado de Kieling (2009)

¹ – CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento (2014)

² – AMICK (1982): as cascas representam 23% do grão

³ – REGO (2001): na combustão 20% da casca é convertido em cinza

2.3 Cinza de casca de arroz

A cinza de casca de arroz é um resíduo agroindustrial decorrente do processo de queima da casca de arroz. Segundo Rego (2001) a cinza apresenta uma estrutura celular, porosa, com alta superfície específica e grande quantidade de sílica (85 a 95%).

Em uma revisão bibliográfica sobre a composição da cinza de casca de arroz, Islabão (2013) realizou uma aproximação da variação dos teores da cinza, chegando aos seguintes teores médios: Carbono orgânico = 82,40 g kg⁻¹; Nitrogênio = 0,35 g kg⁻¹; Fósforo = 2,74 g kg⁻¹; Potássio = 14,02 g kg⁻¹; Cálcio = 5,83 g kg⁻¹; Magnésio = 3,05 g kg⁻¹; Enxofre = 0,75 g kg⁻¹; Cobre = 123 mg kg⁻¹; Ferro = 3419 mg kg⁻¹; Manganês = 1357 mg kg⁻¹; Zinco = 148 mg kg⁻¹, dentre outros elementos.

A variação dos teores de elementos orgânicos e inorgânicos presentes na CCA é resultante de sistema de cultivo, fatores climáticos, ano da colheita, preparação da amostra e métodos de análise (HOUSTON, 1972). Entretanto as principais modificações exercidas nas propriedades físicas e químicas da CCA, como teor de sílica, teor de carbono e superfície específica, estão associadas à sua queima (temperatura, tipo de fornalha e tempo). Os teores de Corg diminuem muito com o aumento da temperatura de queima (GONÇALVES; BERGMANN, 2006). Segundo Pouey (2006), a influência da temperatura e do tempo de queima sobre a composição química não é grande, entretanto, são fatores que determinam a estrutura mineralógica da CCA.

De acordo com alguns autores, a CCA tem sido aplicada em compostos de borracha natural (ISMAEL et al., 1999); na preparação de catalisadores metálicos à base de níquel (CHANG et al., 2001); na fabricação de materiais cerâmicos do tipo refratário ou isolante como componente principal ou secundário (DELLA et al., 2005) e na fabricação de blocos e painéis empregados na construção civil, onde substitui a fibra de madeira comumente utilizada (SANTOS, 1997).

A Figura 2 ilustra resumidamente as aplicações da cinza da casca de arroz, seja como componente principal ou secundário, sendo, portanto uma alternativa para avaliar o problema da disposição das cinzas no meio ambiente, além de gerar produtos de maior valor agregado sem gerar novos resíduos.

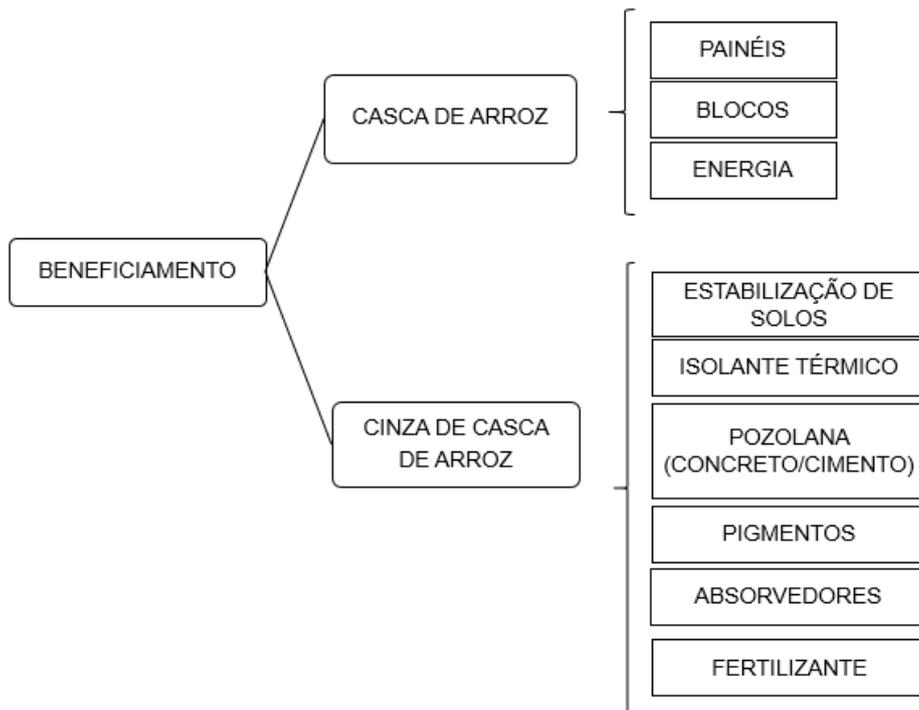


Figura 2 - Diagrama de aplicação da casca de arroz e cinza da casca de arroz resultantes do beneficiamento, adaptado de Della et al. (2001).

2.4 Uso agrícola da cinza de casca de arroz

A utilização da CCA em solos agrícolas é uma das alternativas mais promissoras para o aproveitamento deste resíduo, sendo que seus benefícios vão além da preservação dos recursos naturais.

Sua aplicação em plantios agrícolas apresenta-se como uma importante oportunidade de restituição de parte dos nutrientes removidos pelas culturas e correção da acidez do solo como efeitos imediatos, reduzindo a necessidade do uso de fertilizantes comerciais (ZIMMERMANN; FREY, 2002), contribuindo com a redução da acidez do solo (GAVIOLLI et al., 2007; PINTO et al., 2009; NOLLA et al., 2010), no aumento do suprimento de nutrientes e o desenvolvimento das culturas (DONEGA et al., 2007; SILVA et al., 2008; PALMA et al., 2008). A CCA tipicamente apresenta valores elevados de pH, concentração de nutrientes tais como P, K Ca e Mg e micronutrientes para o crescimento das plantas (ISLABÃO, 2013).

Por ser um produto de baixo custo e de abundância nos municípios que possuem beneficiamento do cereal, a aplicação da CCA nas lavouras tem se tornado uma alternativa cada vez mais comum para diminuir os altos custos de produção, pois a necessidade da correção e adubação constante do solo para recuperar os nutrientes perdidos devido à exploração intensa, implica na elevação dos custos de produção.

Apesar da CCA apresentar grande potencial para ser usada como neutralizador da acidez do solo e como suplemento de nutrientes, principalmente para solos de baixa fertilidade, ela mostrou-se ineficiente como fonte de nitrogênio e matéria orgânica, devido aos baixos teores na CCA, em virtude da queima (ISLABÃO, 2013).

2.5 Lodo de estação de tratamento de esgoto

O lodo de esgoto é o resultado do tratamento dos resíduos líquidos e sólidos urbanos (domésticos, comerciais, industriais) encaminhados por meio das redes coletoras às estações de tratamento de esgoto (ETE).

Seguindo as tendências do crescimento dos índices de coleta e tratamento de esgotos, a quantidade gerada de lodo cresce proporcionalmente ao aumento dos serviços de coleta e tratamento desse resíduo, que, por sua vez, deve acompanhar o crescimento populacional. Em 2010, estimativas apontavam uma produção nacional de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano, considerando que o tratamento de esgoto atingia apenas 30 % da população urbana (PEDROZA et al., 2010).

Diante do progressivo aumento populacional, os problemas ambientais resultantes da geração de resíduos da atividade humana exigem ações que viabilizem

o equilíbrio entre consumo e reuso. No caso do lodo de esgoto não é diferente, pois além do grande volume que exigirá cada vez áreas maiores para descarte, existe ainda o problema ambiental devido à ausência de tratamento adequado do lodo descartado em áreas onde é depositado (GODOY, 2013).

Em muitos países, o lodo é utilizado como condicionador do solo e fertilizante para as plantas, em consequência de sua riqueza em matéria orgânica e nutrientes (DAMASCENO; CAMPOS, 2010). A aplicação do lodo na agricultura parece ser a forma mais difundida de utilização do resíduo. No entanto, outras formas de aproveitamento também estão sendo estudadas, como a incorporação do resíduo na fabricação de produtos cerâmicos, como telhas, tubos, tijolos e lajotas, onde tem-se mostrado uma alternativa viável de destinação (ANDREOLI et al., 2006).

Pesquisas demonstram que é possível ainda utilizar o lodo de esgoto na substituição de agregados leves na fabricação de cimentos e concretos, bem como peças feitas dessas matérias. Adicionas cinzas do lodo ao processo produtor de cimento reduz o custo de produção e, como o cimento é o componente mais caro do concreto, também reduz os custos deste item indispensável na construção civil. É possível substituir 35% do consumo de cimento Portland por lodo calcinado entre temperaturas de 700 °C a 800 °C (GODOY, 2013).

No Brasil, a técnica de adicionar lodo de esgoto na fabricação de cimento Portland ainda não é muito utilizada. Nos EUA, porém, a operação é realizada com frequência por diversas empresas de saneamento. Também em outros países o uso do lodo de esgoto na fabricação de cimento Portland é comum. Em Cingapura, cinzas do lodo de esgoto adicionas à massa asfáltica foram utilizadas com sucesso na construção de estradas (ANDREOLI et al., 2006).

A Figura 3 ilustra resumidamente as aplicações do lodo, seja como reaproveitamento no setor industrial ou no setor agrícola, sendo, portanto alternativas de disposição do resíduo, gerando produtos de maior valor agregado.

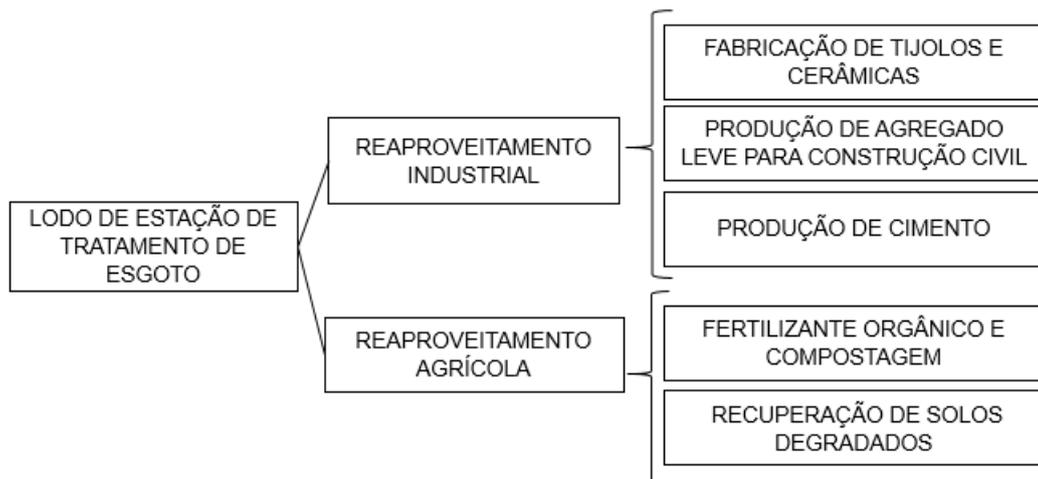


Figura 3 - Diagrama de aplicação de lodo estação de tratamento de esgoto, adaptado de Godoy (2013).

2.6 Uso agrícola do lodo de estação de tratamento de esgoto

A utilização do lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) na agricultura possui viabilidade técnico-econômica dentre as opções de disposição do resíduo, além de diminuir os custos com fertilizantes minerais, melhora as propriedades físicas e químicas do solo (BETTIOL, 2011).

A disposição de lodo de tratamento de esgoto na agricultura é uma prática antiga. As informações mais conhecidas são originárias da China. No ocidente, sabe-se que, na Prússia, a irrigação com efluentes de esgotos era praticada desde 1560. Na Inglaterra, por volta de 1800 foram desenvolvidos muitos projetos para a utilização agrícola dos efluentes de esgoto. No Brasil, a prática de incorporar esse resíduo aos solos não é tão difundida (BETTIOL; CAMARGO, 2006), e isso pode estar associado ao fato da maioria das cidades brasileiras não apresentar rede de coleta de esgotos e/ou estações de tratamento dos mesmos (PIRES, 2006). Segundo IBGE (2010) apenas 55 % do esgoto do país é coletado e destes, apenas 28 % são tratados (PIRES, 2014).

O uso do lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos como fertilizante tem se mostrado uma solução adequada em termos técnico, econômico e ambiental, isto desde que precauções sejam tomadas quanto à qualidade do resíduo, bem como quanto ao tipo e manejo de culturas agrícolas (LOURENÇO, 1999).

Em razão de sua constituição predominantemente orgânica, o lodo de esgoto quando incorporado ao solo, proporciona melhoria no estado de agregação das partículas, acarretando na diminuição da densidade e aumento da macroporosidade, o que possibilita sua maior aeração e capacidade de retenção de água (MELO et al., 1994; PRADO, 2011). Além disso, proporciona aumento na capacidade de troca de cátions (CTC), redução nas concentrações de alumínio trocável, elevação do pH do solo (NASCIMENTO et al., 2013), aumento da população microbiana benéfica do solo, além de ser fonte de macro e micronutrientes para as culturas (GOMES et al., 2007) de forma contínua para o solo e para o sistema radicular das plantas, ao longo dos anos (POGGIANI et al., 2000).

Várias pesquisas concluíram que o LETE levou ao desenvolvimento e produtividade maior ou igual ao proporcionado pelos fertilizantes convencionais. Silva et al. (2008), concluíram no seu estudo, que o LETE foi mais eficiente como fonte de fósforo do que o superfosfato triplo, aplicados em doses equivalentes. Nascimento et al. (2004) constataram aumento do pH e dos teores de N, P, K, Ca e Mg no solo, em função do aumento das doses de lodo. Antolín et al. (2005), verificaram melhoria da qualidade química pela adição do lodo de esgoto em diversos tipos de solo. Behling et al. (2009) observaram que os teores de carbono orgânico nas diferentes camadas do solo aumentaram com o aumento das doses de lodo de esgoto, esses foram mais elevados principalmente na camada mais superficial (0-10 cm), diminuindo para as camadas mais profundas. Em solo adubado durante 10 anos com LETE, Kidd et al. (2007) constataram que o teor de carbono orgânico foi maior que os valores encontrados em solos similares da região não tratados com o resíduo. Segundo Joshua et al. (1998), o aumento da dose de biossólido reduziu a taxa de escoamento superficial em três diferentes tipos de solo, atribuído ao aumento da infiltração de água no solo. A fração orgânica do lodo confere melhor estruturação aos agregados do solo, tornando-o mais resistente à erosão (SOUZA, 2009).

Nascimento et al. (2004) e Da Ros et al. (1993) observaram um aumento importante no teor de nitrogênio total do solo devido à aplicação de lodo de esgoto, indicando a eficiência do resíduo em suprir N para o crescimento vegetal. Os autores Berton et al., (1989) e Da Ros et al. (1993) observaram ocorrência de aumento dos teores de nitrogênio em plantas de milho e milheto, que foram proporcionais ao aumento da doses de lodo de esgoto adicionadas.

A composição química do lodo é de suma importância na recomendação da quantidade a ser aplicada no solo. Conforme a Resolução do CONAMA (2006), as recomendações são calculadas de três maneiras diferentes, sendo através do poder de neutralização e/ou acidificação, teor de metais pesados e teor e disponibilidade do nitrogênio. Das três doses obtidas, aquela que apresentar a menor quantidade de resíduo a ser aplicada ao solo deve ser adotada. Com exceção de lodos calados, a dose limitante geralmente é dada pelo cálculo baseado no teor e na disponibilidade de nitrogênio, sem provocar um excesso de nitrato que possa contaminar os mananciais de água (SOUZA et al., 2011).

A aplicação em toneladas por hectare não deverá exceder o quociente entre a quantidade de nitrogênio recomendada para a cultura em kg ha^{-1} (RAIJ et al., 1997) e o teor de nitrogênio disponível no lodo. Assim: taxa de aplicação (Mg ha^{-1}) = nitrogênio recomendado (kg ha^{-1}) / nitrogênio disponível no lodo (kg Mg^{-1}) (GONÇALVES, 2005).

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes que mais limita a produção das culturas, sendo o elemento mais absorvido e extraído pelas plantas, influenciando de forma significativa na produtividade; o excesso de N ou ausência pode provoca sérios danos as plantas. Em excesso, o N pode reduzir o desenvolvimento e a produtividade. Por outro lado, teores muito baixos de nitrato no solo podem ser limitantes à atividade simbiótica (MOURA et al., 2009).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Departamento de Solos, da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Capão do Leão, RS. A condução do experimento foi realizada no período de 05 de setembro de 2014 a 21 novembro de 2014 em casa de vegetação.

Utilizou-se solo proveniente do Centro Agropecuário da Palma/Capão do Leão - RS classificado conforme Embrapa (1997) como Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico. A amostra foi coletada na camada superficial (0-20 cm), em seguida expostas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 1 cm de malha, após o preparo, foi acondicionado nas unidades experimentais, constituídas por vasos plásticos de 12 dm³.

A caracterização química foi realizada conforme a metodologia descrita por Tedesco et al.(1995) e apresentou a seguinte composição: pH (H₂O) = 4,9; C orgânico = 12,18 g Kg⁻¹; P = 6,2 mg kg⁻¹; K = 77,32 mg kg⁻¹; Ca = 15,35 mmol_c kg⁻¹; Mg = 27,2 mmol_c kg⁻¹; Na = 14,5 mg kg⁻¹; Al = 3,89 mmol_c Kg⁻¹; H+Al = 28,44 mmol_c Kg⁻¹; CTC pH 7,0 = 73,60 mmol_c Kg⁻¹ e V % = 61,4.

A cinza de casca de arroz (CCA) foi proveniente da Empresa SLC Alimentos - Capão do Leão/RS, e foi originada da queima de casca de arroz (CA) a uma temperatura aproximada de 700 °C. O lodo da estação de tratamento de esgoto (LETE) foi fornecido pela Companhia Riograndense de Saneamento de Rio Grande – RS (CORSAN). A caracterização química da CCA e do LETE foram realizadas segundo os métodos descritos em Tedesco et al. (1995) e pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química dos teores totais dos elementos da cinza de casca de arroz (CCA) e do lodo de tratamento de esgoto (LETE)

	PN%	pH	C/N	NH ₄	NO ₃	N	Corg	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn
				--- mg kg ⁻¹ ---		----- g kg ⁻¹ -----			----- mg kg ⁻¹ -----						
CCA	0,76	9,3	29,8	--	--	0,7	20,9	1,5	6,9	2,7	0,8	--	7777	279	645
LETE		4,5	7,14	161	853	41,0	292,8	10,5	2,4	18,3	3,4	88	419	189	9

PN: poder de neutralização

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso no esquema fatorial 6 x 6, com três repetições, totalizando 108 unidades experimentais. O primeiro fator correspondeu as doses de CCA: 0; 4; 8; 16; 32; 64 g por kg⁻¹ de solo e o

segundo fator as doses de LETE: 0; 2; 4; 8; 16; 32 g por kg⁻¹ de solo. As doses de CCA e LETE equivalem respectivamente 0, 8,16, 32, 64, 128 Mg ha⁻¹ e 0, 4, 8, 16, 32, 64 Mg ha⁻¹.

Para a composição dos tratamentos foram utilizados 8,2 kg de solo/vaso (massa seca) combinando as doses de CCA e de LETE. Posteriormente a aplicação e homogeneização dos tratamentos nos vasos, os mesmos foram mantidos incubados por 20 dias. Durante o período de incubação os vasos mantiveram-se protegidos por lona preta e a umidade controlada em 15 % através da adição de água.

Após o período de incubação todas as unidades experimentais foram novamente homogeneizadas, logo realizou-se a coleta de amostras de solo para análise. Para analisar os teores do nitrogênio (N) mineral no solo foram estudadas apenas duas doses de cinza sendo: 0 e 64 g kg⁻¹, com todas as seis doses de LETE. O N mineral foi extraído do solo úmido com KCl 1mol L⁻¹; após a extração procedeu a destilação a vapor empregando-se MgO e liga de Devarda para a determinação de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, conforme Tedesco et al. (1995).

Foram realizada análise do pH (H₂O), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg), cálcio (Ca), manganês (Mn), sódio (Na), ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu) e alumínio (Al), seguindo a metodologia descrita em Tedesco et., al. (1995). Foi realizada a determinação do teor de silício (Si) de cada tratamento, utilizando-se a solução extratora com ácido acético 0,5 mol L⁻¹ de acordo com o método adaptado por Nebel (2005). O poder de neutralização (PN) da CCA foi determinado conforme o método geral descrito por Tedesco et al. (1995), mas utilizando HCl e NaOH menos concentrados, 0,005 mol/L. Para analisar os teores do carbono orgânico (Corg) no solo foram estudadas apenas as doses 0 e 64 g kg⁻¹ de cinza com todas as seis doses de LETE através do método Walkley-Black.

Após a coleta de solo para análise, todas as unidades experimentais receberam a semeadura de doze sementes da cultivar de milho MORGAM 30A77PW, após cinco dias ocorreu a germinação das plântulas de milho. O desbaste foi realizado dez dias após a emergência, deixando seis plantas por vaso (APÊNDICE B).

Durante toda a realização do experimento, o solo foi mantido com umidade gravimétrica de 15 %, pela adição diária de água.

Aos quarenta e cinco dias após a germinação das plântulas, a parte aérea das plantas de milho foi colhida. Em seguida, submetidas à secagem em estufa a temperatura aproximadamente de 65° C, até obter peso constante, para obtenção da

produção de matéria seca da parte aérea das plantas. O tecido seco foi moído e submetido a análise de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, segundo a metodologia descrita em Tedesco et al. (1995).

Todas as análises químicas de solo e planta foram realizadas no laboratório de Química do Solo, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Pelotas.

Os resultados obtidos no experimento foram submetidos à análise de variância, onde foram avaliados os efeitos das variáveis bem como as interações entre elas. Foram feitas também análises de regressão entre as doses de LETE e CCA nos parâmetros do solo e da planta, utilizando-se o programa estatístico SigmaPlot (2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Efeitos da CCA e do LETE nos atributos químicos do solo

4.1.1 pH em água

Não houve interação significativa entre os dois resíduos ($p > 0,01$) na variável estudada. No entanto, a CCA aumentou o pH do solo, provocando um efeito corretivo da acidez do mesmo (Figura 4). Observou-se um efeito linear crescente nos valores do pH do solo em função das doses de CCA. Na dose mais alta desse resíduo (64 g kg^{-1}) na ausência de LETE, o pH atingiu valor o máximo de 5,7. Nas outras doses de lodo, a cinza também proporcionou aumentos significativos no pH, entretanto, os valores observados foram menores. Este efeito da cinza no pH corrobora com os dados obtidos por Pinto et al. (2009) e Sandrini (2010). Islabão (2013) constatou em seu experimento de campo que, além da CCA ter atuado como corretivo de acidez do solo, o resíduo reagiu muito mais rápido que o calcário convencional, entretanto apresentou baixo PRNT, devido ao PN muito baixo, da ordem de 1%.

A aplicação de LETE proporcionou uma diminuição significativa do pH até a dose máxima testada, na qual atingiu 4,5 dentro da dose zero de cinza (Figura 4). A diminuição do pH nesses tratamentos deve-se, provavelmente, ao baixo pH do resíduo (Tabela 2) e possivelmente ao processo de nitrificação (BETTIOL; FERNANDES, 2004) onde o amônio é oxidado a nitrito e nitrato, com a produção líquida de dois íons H^+ . Tsadilas et al. (1995), em estudo de vasos, observaram redução do pH de 7,4 para 7,1, atribuindo esta diminuição à maior nitrificação induzida pelo aporte de N via lodo. Bettiol et al. (2004) verificaram uma queda de 0,9 unidades no pH do solo que havia recebido lodo em relação ao solo controle. Os autores também atribuíram esta queda ao processo de nitrificação do amônio.

Em média, o pH aumentou 0,014 unidade para cada grama de CCA aplicada por kg de solo, enquanto diminuiu 0,017 unidade para cada grama de LETE aplicada por kg de solo. Logo, o efeito negativo do LETE no pH foi maior do que o efeito positivo da CCA por unidade de massa dos resíduos aplicados ao solo. Usando estes valores, os efeitos destes dois resíduos no pH anulam-se mutuamente quando a dose de CCA for 1,2 vezes a dose de LETE.

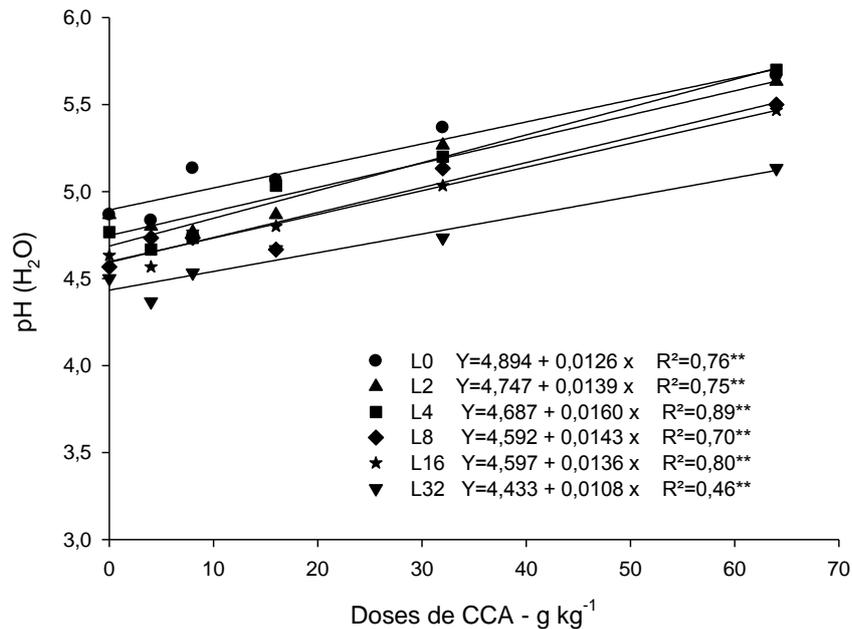


Figura 4 - Variação do pH em água no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

4.1.2 Cátions trocáveis e acidez titulável no solo

Potássio

Não foi observada interação ($p > 0,01$) entre a CCA e o LETE no teor de potássio (K) no solo (Tabela 3), sendo constatado somente efeito significativo das doses de CCA. O teor do nutriente aumentou com o aumento do resíduo, inferindo que a cinza é fonte de potássio solúvel.

Essa resposta é decorrente do teor de K do resíduo (Tabela 2). Assim como os cátions Mg e Na que compõem substâncias mais solúveis, dissolvendo rapidamente após a incorporação da CCA ao solo (ISLABÃO, 2013). Os resultados obtidos corroboram com os dados obtidos por Sandrini (2010), que observou um aumento significativo dos teores de K disponível no solo com a incorporação de $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de CCA. Islabão (2013) verificou um efeito marcante e imediato da cinza no teor de K trocável no solo aos quinze dias após a aplicação de doses crescentes de cinza no solo. Santin e Vahl (1985), observaram que a aplicação de CCA ao solo apresentou potencial como fonte de K para as culturas.

Em relação ao efeito nulo do LETE, esse comportamento também pode estar

relacionado com a concentração do nutriente na composição do resíduo (Tabela 2). Entretanto, tal resultado não corrobora com grande parte dos estudos, onde os autores Bonini et al., (2014); Nascimento et al., (2014), observaram aumentos do nutriente com aplicação de LETE.

Cálcio e Magnésio

A adição dos resíduos CCA e LETE ao solo, proporcionaram interação significativa ($p > 0,01$) para o cálcio e magnésio (Tabela 3). A cinza não afetou significativamente o Ca, possivelmente o nutriente nesse resíduo ainda não havia solubilizado completamente até a coleta da amostra. Nos teores médios observados para o Mg a cinza apresentou efeito significativo obtendo teor máximo de 37,5 mmol_c kg⁻¹, com aplicação de 64 g kg⁻¹ de cinza. Aparentemente o Mg da CCA, ao contrário do Ca, foi liberado na forma trocável no solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Sandrini (2010). O autor constatou que não houve efeito nos teor de Ca extraível do solo nos tratamentos que receberam a aplicação de CCA. Entretanto, este dado contraria os resultados encontrados por Sander et al. (2008), estudando o desenvolvimento do milho adubado com CCA, os respectivos autores, verificaram um aumento significativo nos teores de Ca e Mg no solo proporcionado pela incorporação de 35, 70 e 100 Mg ha⁻¹ de CCA, variando de 0,65 a 1,20 cmol_c dm⁻³ de Ca e 0,30 a 1,37 cmol_c dm⁻³ de Mg.

Nas doses que receberam LETE houve um incremento significativo dos dois nutrientes no solo (Tabela 3), os teores médios variaram de 15,5 a 24,7 mmol_c kg⁻¹ para o Ca e de 30,0 a 37,2 mmol_c kg⁻¹ para o Mg com as doses 0 e 32 g kg⁻¹ de LETE, respectivamente. Na composição do lodo (Tabela 2) há quantidades expressivas dos dois nutrientes, o que pode ter influenciado no aumento de ambos elementos no solo. Bonini (2014) ao incorporar as doses 0, 10, 20, 30, 40 e 50 Mg ha⁻¹ de lodo constatou um aumento linear dos teores trocáveis de Ca, Mg e K no solo.

Sódio

Não houve interação significativa ($p > 0,01$) entre os dois resíduos sobre o nutriente. A CCA promoveu um aumento significativo no teor de sódio (Na) no solo com a ausência de LETE (Tabela 3). Nessa dose, o teor médio de Na variou entre 0,47 a 1,12 mmol_c kg⁻¹, onde foi possível atingir o teor mais alto do nutriente no solo com a

aplicação de 64 g kg^{-1} de cinza. Os dados obtidos estão de acordo com Sandrini (2010), o autor ao analisar os teores de Na disponível no solo dos tratamentos que receberam a aplicação de CCA, constatou uma variação de 47,99 a $97,55 \text{ mg kg}^{-1}$ usando 2,2 a $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de CCA, respectivamente.

Os valores médio do Na não foi afetado com a aplicação das doses de lodo. Este resultado, está em concordância com o observado em outros trabalhos (ROSS et al., 1990; NASCIMENTO et al., 2004).

Alumínio

Não foi constatado interação significativa ($p > 0,01$) para a CCA e o LETE na variável estudada. A aplicação de ambos resíduos proporcionaram uma diminuição significativa nos teores de Al do solo correspondente ao aumento das doses (Tabela 3). Os tratamentos que receberam a aplicação da CCA com ausência do LETE, apresentaram uma variação média nos teores de 3,84 a $0,86 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, nas doses 0 e 64 g kg^{-1} , respectivamente. O efeito do LETE foi menos marcante em relação a cinza, apresentando valores médios que variaram entre 2,35 a $1,86 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, nas doses 0 e 32 g kg^{-1} , respectivamente.

O decréscimo do teor de Al no solo pode estar relacionado com a elevação proporcional do pH em relação ao aumento das doses de CCA (SANDRINI, 2010) (Figura 4), e ao fornecimento de Ca e Mg com as doses de LETE incorporadas ao solo, bem como a complexação de Al pela matéria orgânica do resíduo.

H+Al

Houve interação significativa ($p < 0,01$) para H+Al entre os dois resíduos aplicados (Tabela 3). A CCA diminuiu significativamente o H+Al, enquanto que o LETE aumentou significativamente os valores da variável. Seguindo a média dos valores obtidos para H+Al com as doses de CCA, houve uma diminuição de aproximadamente $7,0 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, podendo ser decorrente da reação química do material corretivo aplicado ao solo (MALAVOLTA, 1981). A adição de doses crescentes de CCA ao solo proporciona o aumento gradual e significativo nos valores do pH (Figura 4), implicando na redução do H+Al. Já o aumento causado com as doses de LETE, foi cerca de $6,0 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Esse aumento da acidez pode ter proporcionado incremento dos teores de Al trocável e, conseqüentemente, elevação dos valores de H+Al (SIMONETE, 2003).

Tabela 3 - Teores médios dos cátions trocáveis e acidez titulável no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE)

LETE g kg ⁻¹	CCA g kg ⁻¹						Média
	0	4	8	16	32	64	
-----K (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	1,88	2,19	2,65	3,21	4,35	7,70	3,66 a
2	1,92	2,40	2,60	3,17	4,41	8,27	3,80 a
4	2,05	2,46	2,88	3,64	3,50	8,84	3,90 a
8	2,22	2,33	2,64	3,12	4,56	7,54	3,73 a
16	1,91	2,31	3,19	2,73	4,00	7,74	3,65 a
32	1,96	2,26	2,67	3,21	4,39	7,96	3,74 a
Média	1,99 F	2,33 E	2,77 D	3,18 C	4,20 B	8,01 A	CV% = 12.96
-----Ca (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	15,4 cA	14,8 cA	14,9 cA	15,1 bA	16,3 cA	16,2 cA	15,5 e
2	16,4 cA	16,9 cA	16,8 cA	17,3 bA	18,0 bcA	17,5 bcA	17,2 de
4	16,5 cA	17,1 cA	18,8 bcA	18,1 bA	19,5 bcA	19,1 bcA	18,2 cd
8	19,6 bcA	19,0 bcA	19,0 bcA	19,6 abA	20,5 abcA	20,0 abcA	19,6 c
16	22,2 abA	22,3 abA	22,8 abA	23,5 aA	21,5 abA	22,0 abA	22,4 b
32	26,2 aA	25,1 aA	24,2 aA	23,3 aA	24,7 aA	24,9 aA	24,7 a
Média	19,4 A	19,2 A	19,4 A	19,5 A	20,1 A	19,9 A	CV% = 15.28
-----Mg (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	27,2 bA	29,2 bA	28,6aA	29,9 aA	32,9 aA	32,5 bA	30,0 d
2	31,0 abA	31,8 abA	31,5 aA	31,9 aA	33,4 aA	34,3 abA	32,3 cd
4	31,5 bAB	28,5 bB	34,5 aAB	34,01aAB	36,3 aAB	37,8 abA	33,7 bc
8	35,7 aA	34,1 abA	36,8 aA	34,7 aA	39,3 aA	38,2 abA	36,5 ab
16	35,4 abA	37,5 aA	36,1 aA	37,2 aA	38,3 aA	40,6 abA	37,5 a
32	36,5 aA	35,9 abA	35,8 aA	36,1 aA	37,6 aA	41,5 aA	37,2 a
Média	32,8 C	32,9 C	33,9 BC	34,0 BC	36,3 AB	37,5 A	CV% = 14.68
-----Na (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	0,63	0,53	0,68	0,68	0,85	1,18	0,76 a
2	0,48	0,53	0,61	0,64	0,85	1,00	0,69 ab
4	0,43	0,64	0,61	0,71	0,69	1,14	0,70 ab
8	0,44	0,51	0,49	0,68	0,85	1,12	0,68 ab
16	0,40	0,47	0,64	0,56	0,76	1,22	0,68 b
32	0,44	0,49	0,52	0,64	0,83	1,07	0,66 b
Média	0,47 E	0,53 DE	0,59 CD	0,65 C	0,81 B	1,12 A	CV% = 17.82
-----Al (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	3,89	3,08	2,59	2,27	1,62	0,65	2,35 bc
2	4,05	3,89	3,73	2,11	1,62	0,65	2,68 ab
4	4,22	3,41	3,57	2,59	1,62	1,46	2,81 a
8	4,86	3,73	3,08	2,59	1,14	0,65	2,68 ab
16	3,57	3,57	2,43	1,95	0,81	1,14	2,24 cd
32	2,43	2,92	2,76	1,30	1,14	0,65	1,86 d
Média	3,84 A	3,43 AB	3,03 B	2,14 C	1,32 D	0,86 E	CV% = 25.99
-----H+Al (mmol _c kg ⁻¹)-----							
0	28,44 aA	27,71 aA	26,75 bA	28,912 abA	25,056 bA	23,85 abA	26,79 cd
2	30,13 aA	28,68 aAB	26,02 bAB	26,02 bAB	22,40 bB	23,12 abB	26,06 d
4	29,16 aA	29,89 aA	28,68 abA	27,47 abA	26,99 abAB	20,47 bB	27,11 bcd
8	31,33 aA	32,54 aA	29,40 abAB	29,88abAB	28,44 abAB	23,37 abB	29,16 bc
16	30,37 aA	31,33aA	31,82 abA	30,61 abA	28,68 abA	25,54 abA	29,72 b
32	34,95 aA	33,51 aAB	34,95 aA	33,26 aAB	33,02 aAB	27,71 aB	32,90 a
Média	30,73 A	30,61 A	29,60 AB	29,36 AB	27,43 B	24,01 C	CV% = 14,49

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade. O Coeficiente de variação (CV) é referente a todos os tratamentos da variável estudada.

4.1.3 Capacidade de troca de cátions e saturação de bases e de alumínio

Não foi constatada interação ($p > 0,01$) entre os resíduos, entretanto, foi possível constatar que a capacidade de troca de cátions a pH₇ (CTC₇), avaliada pela soma das bases trocáveis (Ca, Mg, K e Na) com a acidez titulável a pH₇ (H+Al), foi significativamente ($p < 0,01$) afetada pelas doses de cinza e lodo (Figura 5a). Ambos resíduos proporcionaram um aumento nos valores médios da CTC₇, entretanto, o lodo foi quem mais aumentou esses valores (Figura 5b), variando de 7,67 a 9,92 mmol_c kg⁻¹, comparados aos valores nas doses de CCA que foram de 8,55 a 9,06 mmol_c kg⁻¹.

O aumento da CTC com adição de cinza e lodo, reflete o balanço entre os aumentos nos teores de Ca, Mg, K e H+Al utilizados no cálculo. Islabão (2014) em experimento de campo, constatou ausência de efeito da CCA na CTC₇ mesmo em doses altas como 140 t ha⁻¹ inferindo que a CTC da CCA seria semelhante à do solo usado. Em relação ao efeito do LETE, alguns estudos relatam a relação direta da matéria orgânica sobre a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (RODRIGUES et al., 2007; RICCI et al, 2010; SCHIAVONI et al, 2011; COSTA et al., 2014; BONINI, 2015).

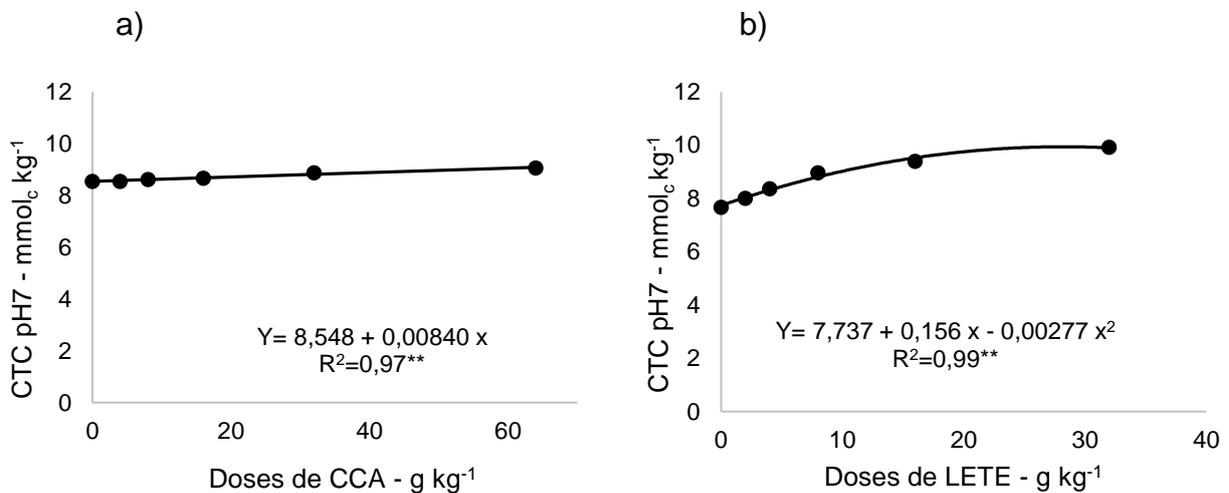


Figura 5 - Variação da CTC pH₇ do solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Para as demais variáveis, só foi possível constatar interação significativa para a saturação de base entre os resíduos aplicados. A CCA proporcionou efeito significativo ($p < 0,01$) na saturação de base (V%) e de alumínio (m %) (Figura 6a, c). Na saturação de bases (V%) a aplicação crescente aumentou gradualmente os valores médio dos tratamentos, variando de 63,77 % a 73,33 % nas doses 0 e 64 g kg⁻¹.

¹ de cinza (Figura 6a). Em relação a saturação de alumínio (m%) a cinza proporcionou efeito contrário, os valores médio diminuíram, variando de 6,75 % a 1,27 % nas mesmas doses (Figura 6c).

As doses de LETE foram significativas apenas na saturação de alumínio, apesar do efeito menor em relação a cinza, os valores variaram entre 4,63 % a 2,78 % (Figura 6d). Alguns autores constatarem aumento dos valores de V% aplicando compostos orgânicos (CHUEIRI et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2014), a resposta da saturação de base nesse estudo (Figura 6b) se deve a uma relação de seus valores com o pH do solo (Figura 4), assim como o efeito da saturação do alumínio. Isto ocorre em função do efeito corretivo no momento da aplicação dos resíduos, no caso da cinza resulta na neutralização de grande parte do alumínio trocável e conseqüentemente reduzindo a saturação de alumínio, já no caso do lodo como o pH é menor, a resposta não segue os mesmos parâmetros.

A matéria orgânica do LETE complexa o Al, diminuindo o teor deste elemento linearmente com a dose de LETE aplicada. Assim, embora este resíduo não tenha diminuído o pH do solo ele diminuiu a toxidez de Al.

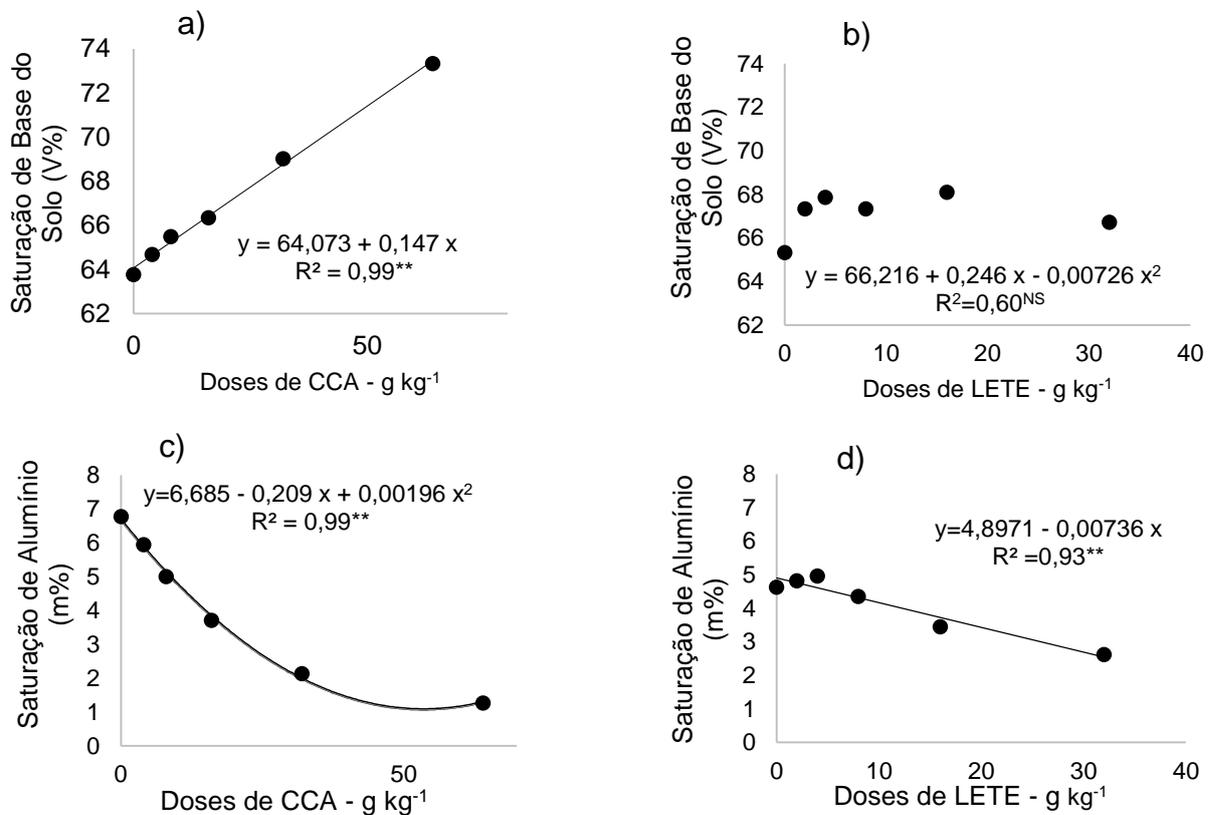


Figura 6 - Saturação de Base (V%) (a, b) e Saturação do Alumínio (m%) (c, d) do solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE), respectivamente. ^{**}Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{NS} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

4.1.4 Fósforo e silício do solo

Não houve interação significativa ($P>0,01$) entre a CCA e LETE para o fósforo (P) extraível do solo pelo método Mehlich-1. Entretanto, os dois resíduos proporcionaram efeito significativo na variável estudada, aumentando o teor do nutriente com o aumento das doses de cada resíduo (Figura 7). Foi observado que o efeito do LETE foi maior do que o efeito da CCA (Figura 7b), o que pode ser justificado pelo teor de P na composição de cada resíduo (Tabela 2). O teor de P no LETE é cerca de dez vezes superior ao da CCA, com base nisso, o aumento do P extraível promovido pela cinza (Figura 7a) representou uma fração maior do P total contido nesse resíduo, com aproximados 63 %, quando comparado ao lodo com 27 %. Tal aumento pode ser atribuído ao Si da CCA. O silício pode competir com o P pelos sítios de adsorção no solo diminuindo a adsorção do P e, em consequência, aumentando a solubilidade deste nutriente (ISLABÃO et al., 2013).

Estes dados corroboram com a pesquisa realizada por Pauletto et al. (1990) em que aplicação de CCA elevou o pH e os teores de P e K. Sandrini (2010) observou que a aplicação de $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de cinza de casca de arroz promoveu um maior de P extraível pelo Mehlich-1. Em relação ao LETE, estudos mostram a eficiência do resíduo como fonte de P. Bonini (2015) observou o aumento do teor de fósforo em todas as camadas de um Latossolo com aplicação do lodo de esgoto. Nascimento et al., (2004) constatou que a aplicação de lodo de esgoto promoveram o aumento nos teores de P disponível no solo, utilizando o método preconizado por EMBRAPA.

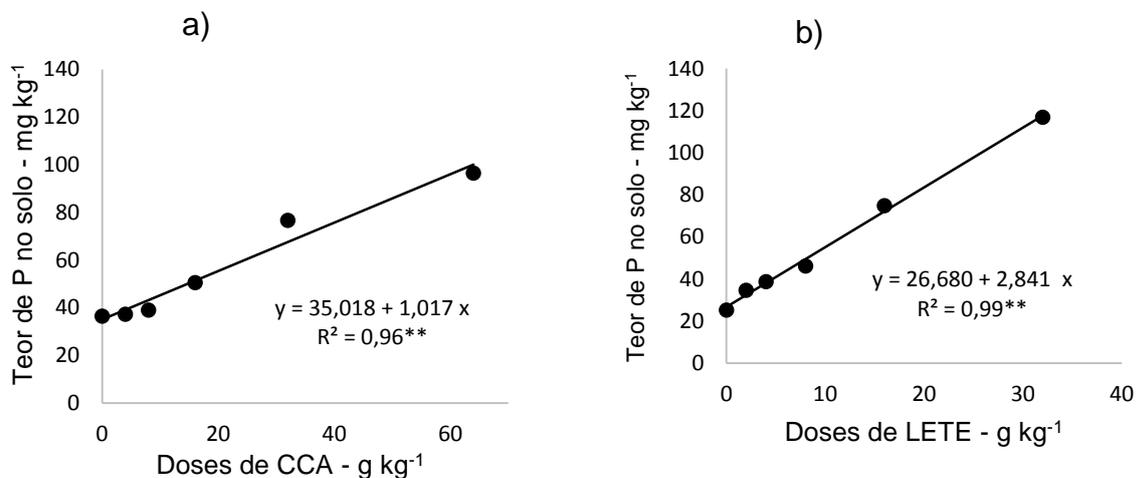


Figura 7 - Teores médios de P no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Houve interação significativa entre os fatores CCA e LETE ($p < 0,01$) para o silício do solo. A CCA na ausência de LETE proporcionou efeito significativo, aumentando o teor de silício no solo (Figura 8a). Já nos tratamentos que receberam as doses de lodo, houve uma diminuição, porém não significativa dos teores do Si (Figura 8b).

Islabão (2013) também constatou aumento do teor de silício no solo com o aumento de doses de cinza. Sandrini (2010) verificou que aplicação de CCA proporcionou um efeito linear crescente dos teores de Si extraível do solo, variando de 15,01 a 19,85 mg kg⁻¹ de Si com as doses 2,2, a 17,5 Mg ha⁻¹, respectivamente. Machado e Luz (2009), constataram o aumento da concentração de Si no solo de 20,70 a 21,80 mg kg⁻¹ proporcionado pela aplicação de 1,2 e 2,4 Mg ha⁻¹ de CCA, respectivamente.

Nessa variável os teores obtidos em todos os tratamentos, inclusive na testemunha, estão acima do nível crítico de silício no solo, que é de 9 mg dm³ (KONDORFER et al., 1999).

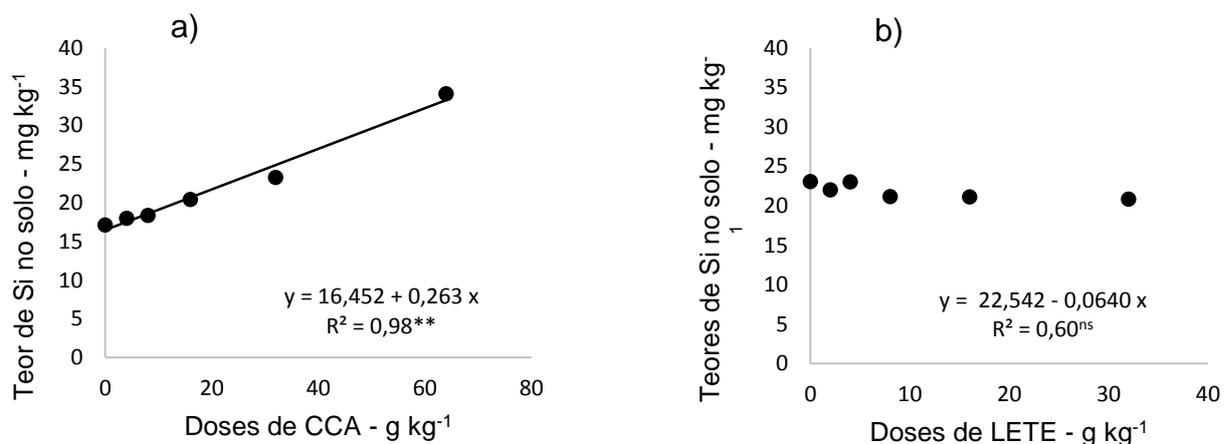


Figura 8 - Teores médios de Si no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

4.1.5 Nitrogênio e carbono orgânico do solo

Não houve interação entre a CCA e LETE sobre as duas variáveis estudadas ($P > 0,01$). A CCA não afetou os teores de N e de Corg do solo, por outro lado, houve aumento significativo das variáveis proporcionado pela adição de LETE (Figura 9a, b).

A ausência de efeito da CCA sobre o N e o Corg, também foram constatados por Islabão (2013). Segundo esta autora, o teor de N da CCA era muito baixo para afetar o teor deste elemento no solo.

Nos tratamentos que receberam o LETE, os teores de N mineral variaram de 18,92 a 72,62 mg kg⁻¹, nas doses 0 e 32 g kg⁻¹, respectivamente (Figura 9a).

Foi constatado efeito marcante o nitrogênio mineral nas doses mais alta dos dois resíduos combinados (CCA + LETE), atingindo teor máximo de 103 mg kg⁻¹ de N (Figura 9a), inferindo que a aplicação em conjunto dos dois resíduos possuem um potencial maior, resultando no aumento do nutriente no solo, quando comparado ao efeito isolado de cada resíduo, conseqüentemente fornecendo maiores concentrações à planta.

O aumento do Corg foi evidente com a aplicação do LETE (Figura 9b), o que pode ser justificado pelo teor deste na composição do resíduo, correspondente a 292,84 g kg⁻¹. Enquanto que, o Corg da cinza, embora presente em concentração considerável na CCA (82,4 g kg⁻¹), provavelmente não estava na forma orgânica, de modo que não foi detectado pelo método de Walkley-Black descrito por Tedesco et al. (1995).

Os dados referente as doses de LETE corroboram com os resultados obtidos por Nascimento et al. (2004), Trannin et al. (2007) e Hoffmann (2012), que também constataram aumento do carbono orgânico do solo com a aplicação do lodo. Entretanto, apesar do LETE ter influenciado o Corg do solo, o aumento observado foi menor que o aumento esperado. Quando aplicado 32 g kg⁻¹ de LETE, era esperado um aumento cerca de 9 g de Corg kg⁻¹ de solo. Entretanto, o aumento foi menor que 2 g de Corg kg⁻¹ de solo. Apesar do valor baixo observado ainda seria possível, visto que, embora os lodos de esgoto possuam teor relativamente alto de C orgânico, após sua aplicação há expressivo consumo de matéria orgânica no solo (ROWELL et al., 2001), estimando que parte da matéria orgânica contida no lodo, seja consumida na reação (BOEIRA et al., 2007).

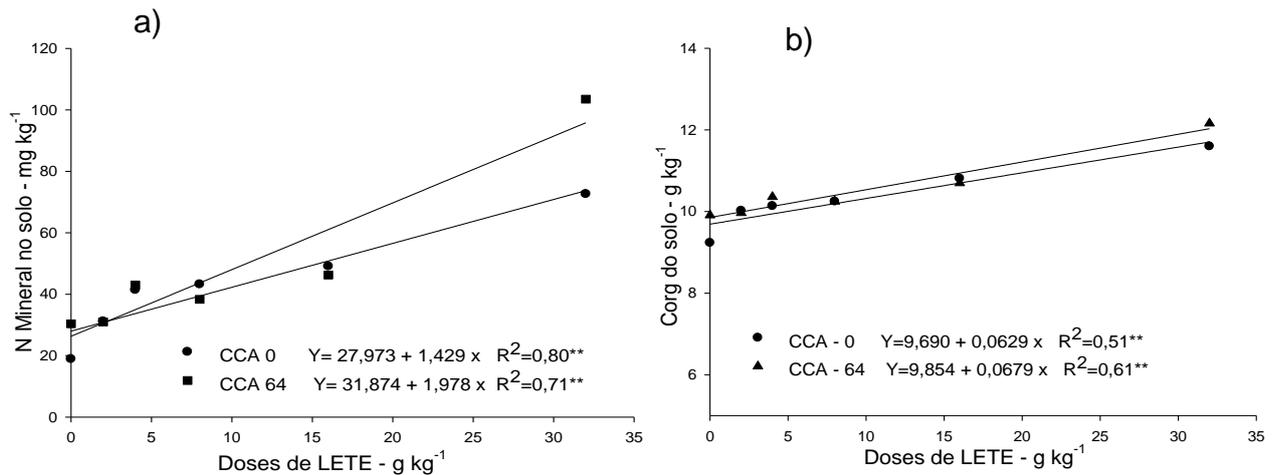


Figura 9 - Variação dos teores de Nitrogênio (N) mineral (a) e Carbono orgânico (Corg) (b) no solo em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. **ns** Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

4.1.6 Teores de ferro, manganês, cobre e zinco no solo

Houve interação significativa ($p < 0,01$) entre a CCA e o LETE apenas para o ferro (Fe) e o zinco (Zn) (Figura 10). Para o Mn, houve efeito significativo apenas nos tratamentos que receberam as doses de CCA (Figura 10c), os valores médio obtidos nessa variável 'variaram de 25,80 a 14,79 mg kg⁻¹. Mas de um modo geral, apesar do Mn ser a única variável afetada de forma significativa pela cinza, o resíduo também proporcionou uma diminuição nos teores de Fe (Figura 10a) e cobre (Cu) (Figura 10e). Em relação as doses de LETE, observou efeito significativo somente para o Fe (Figura 10b) e o Zn (Figura 10d). Entretanto, o efeito de ambas variáveis não seguiu o mesmo parâmetro, o lodo diminuiu os teores de Fe de 279,65 para 194,83 mg kg⁻¹, enquanto que para o Zn o efeito foi contrário, houve aumento dos teores do elemento no solo de 5,30 para 18,56 mg kg⁻¹, nas doses 0 e 32 g kg⁻¹ de lodo, respectivamente em ambas as variáveis.

O decréscimo dos micronutrientes, com exceção do zinco, nos tratamentos com CCA, justifica-se pelo fato de que esse resíduo provoca o aumento do pH do solo e estes nutrientes tem a solubilidade reduzida com a elevação do pH. Além disso, por ser considerado um bioissorvente, a cinza é constituída principalmente por macromoléculas que apresentam grupos funcionais que são apontados como os principais sítios ativos para sorção de íons metálicos, sendo possíveis mecanismos de complexação e troca iônica, conforme Montanher (2009). Segundo Sposito (1989), elementos considerados

metais podem formar complexos de esfera interna com os argilominerais e ser fortemente complexado pela matéria orgânica. É possível que compostos orgânicos da CCA e do LETE desempenhem este papel e isto explique a diminuição dos teores extraíveis do Fe, Mn e Cu com os resíduos aplicados ao solo.

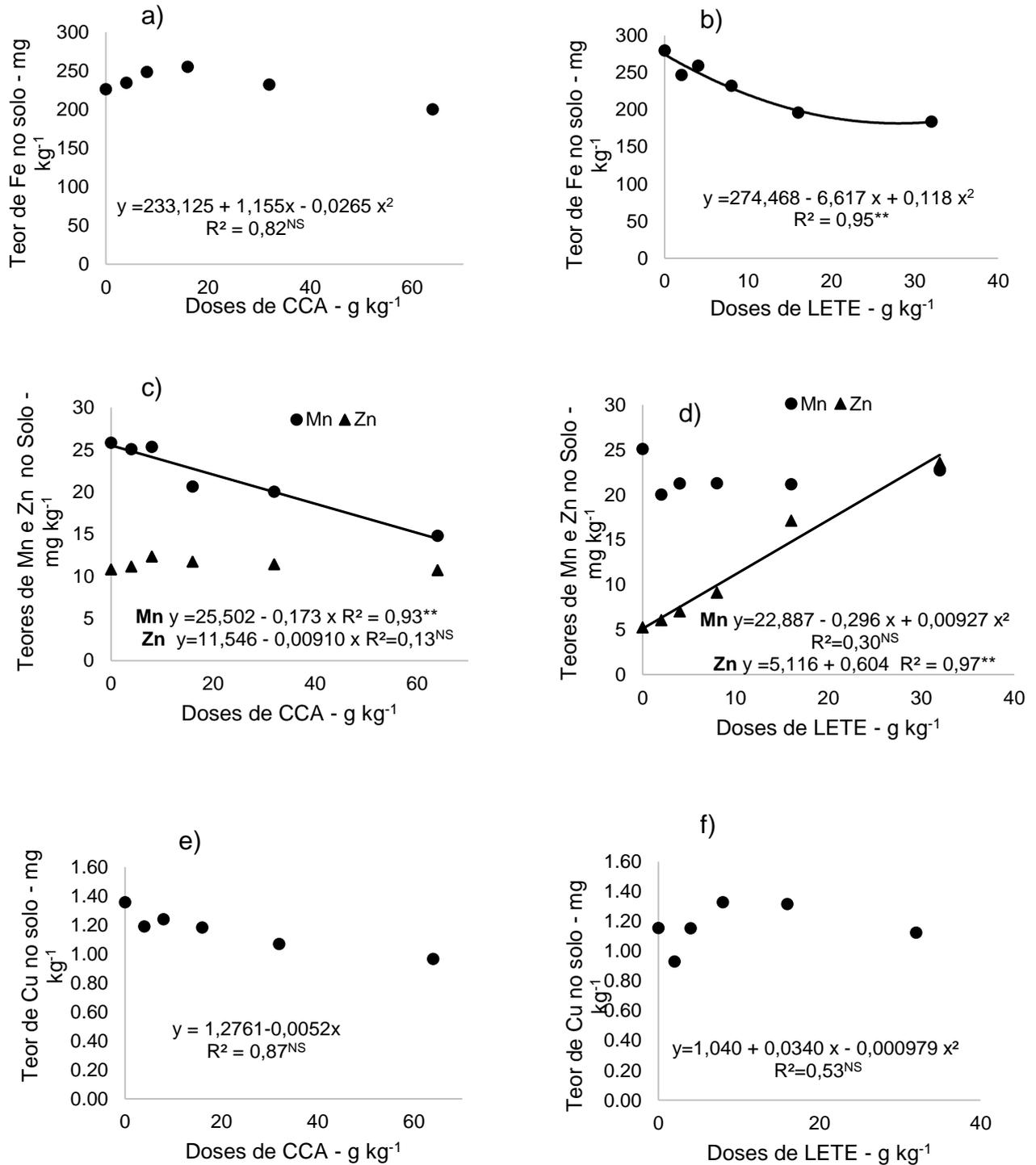


Figura 10 - Teores do Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn) e Cobre (Cu) do solo extraíveis com Mehlich-1 em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) (a, c, e) lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE) (b, d, f). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{NS} Não Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

4.2 Produção de massa seca da parte aérea das plantas (MSPA)

Houve interação significativa ($p > 0,01$) entre os dois resíduos sobre a MSPA. A aplicação de CCA com ausência de LETE promoveu um aumento significativo ($p > 0,01$) na produção de MSPA do milho em relação ao tratamento testemunha (Figura 11). Na dose 0 g kg^{-1} de LETE, a produção máxima de massa seca das plantas foi $12,48 \text{ g vaso}^{-1}$, atingida com a dose de 48 g kg^{-1} de CCA, três vezes mais do que produção encontrada na testemunha, dose zero de CCA, que foi de $4,12 \text{ g vaso}^{-1}$. O efeito da CCA seguiu significativo ($p > 0,01$) ainda nas doses combinadas com 2 e 4 g kg^{-1} de LETE, a produção máxima atingida em cada uma dessas doses foram $12,14$ e $13,80 \text{ g vaso}^{-1}$ com uma dose de 44 g kg^{-1} de CCA, em ambas doses de lodo. Não houve efeito significativo da CCA no crescimento das plantas dentro das demais doses de LETE ($8, 16$ e 32 g kg^{-1}). Entretanto, foi observado que para atingir a produção máxima dentro dessas doses, só foi possível através da contribuição por parte da cinza aplicada. A exemplo da maior dose testada de lodo (32 g kg^{-1}), onde a produção máxima atingida foi de $17,90 \text{ g vaso}^{-1}$ com uma dose de 8 g kg^{-1} de CCA. As doses de cinza que proporcionaram a produção máxima da MSPA em cada dose de lodo, remete a dose de máxima eficiência técnica (DMET) do resíduo sobre variável (Figura 12), com isso, pode-se inferir que, mesmo com aplicação do lodo, rico em nutrientes, a combinação dos dois resíduos se mostrou mais eficiente.

Em relação a aplicação do LETE com ausência da CCA, houve aumento significativo da MSPA até a dose máxima testada, na qual atingiu $16,38 \text{ g vaso}^{-1}$ de MSPA, sendo quatro vezes maior do que a produção encontrada na testemunha, dose zero de LETE (Figura 11). Essa maior produção se deve provavelmente à maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, principalmente a disponibilidade de nitrogênio.

Os valores de MSPA com a aplicação de cinza corroboram com os dados obtidos por Silva et al. (2008) e Sandrini (2010). Estes autores observaram o aumento da massa seca de gramíneas com a aplicação de CCA, e associaram esse aumento com a correção da acidez do solo. Já o baixo teor de N determinado na CCA estudada (Tabela 2), pode ter limitado o crescimento das plantas de milho, quando comparados aos tratamentos que receberam o LETE.

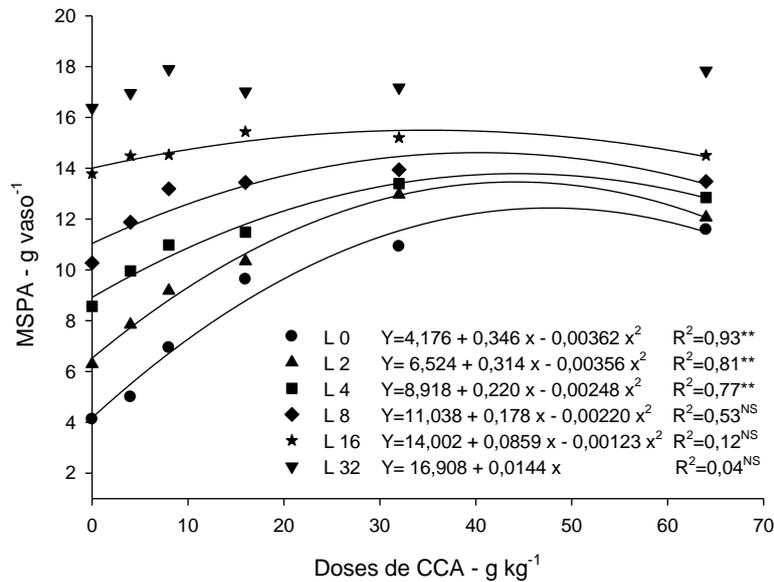


Figura 11 - Produção da massa seca da parte aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{NS} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

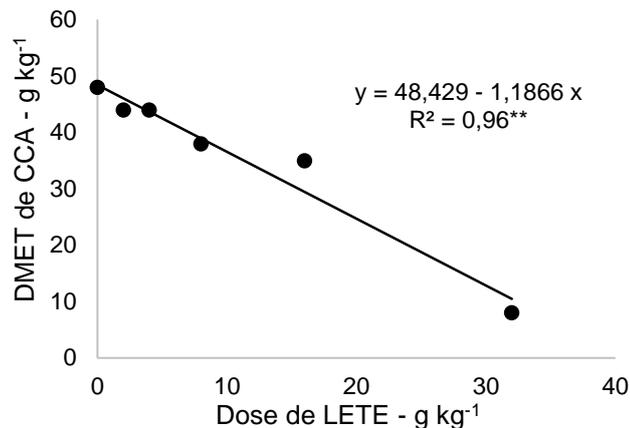


Figura 12 - Dose máxima de eficiência técnica (DMET) da CCA em função da dose de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

4.3 Teor e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio nas plantas

Não houve interação significativa para os nutrientes ($p > 0,01$), com exceção do Potássio. O efeito de cada resíduo sobre as variáveis são descritos a seguir: houve efeito significativo ($p < 0,01$) da CCA sobre a concentração de nitrogênio (N) nas plantas de milho (Figura 13a). A concentração do nutriente diminuiu com o aumento

das doses de CCA (Figura 13a), os valores variaram de 27,72 a 18,31 g kg⁻¹ nas doses 0 e 64 g kg⁻¹, respectivamente. Essa queda da concentração do N com a aplicação de CCA verificada na presença das menores doses de LETE pode ser consequência da diluição do N nas plantas devido ao aumento da produção MSPA nestes tratamentos sem o aumento proporcional no suprimento do nutriente pela CCA, ao contrário do observado no N acumulado na parte aérea das plantas (Figura 13b), onde constatou-se que a cinza, apesar de efeito não significativo, proporcionou o aumento do nutriente nas plantas nas primeiras doses, já nas demais doses a cinza manteve efeito nulo. Logo, pode-se inferir que a CCA não é uma fonte de N para as plantas, e isso se deve a pouca quantidade de N fornecida via cinza, justificado pela volatilização do nitrogênio presente na casca de arroz, após o seu processo de queima. Os dados de concentração estão de acordo com os resultados obtidos por Sandrini (2010), que verificou em seu experimento que os teores de N na planta diminuíram com a aplicação de CCA.

Por outro lado, as concentrações do N aumentaram com a aplicação de LETE mesmo com o aumento da MSPA promovido pelo próprio lodo (Figura 13a), os valores chegaram a 34,36 g kg⁻¹ na dose mais alta de LETE testada. Foi possível, observar um aumento linear de N acumulado na parte aérea das plantas (Figura 13b) em todas as doses testadas. Apesar do lodo apresentar em sua composição concentração alta de nitrogênio (Tabela 2) o aumento observado foi menor que o esperado, isso se deve provavelmente pelas condições do lodo utilizado, o mesmo não era lodo fresco e se encontrava na área de coleta por um período prolongado, proporcionando maior estabilização ao lodo, podendo dessa forma ter afetado na disponibilidade de N para plantas, em consequência menor concentração na MSPA.

De acordo com Reuter e Robinson (1997), o teor crítico de deficiência do N na parte aérea inteira (seca) do milho é de 35 g kg⁻¹. Após 26 dias da aplicação dos tratamentos, foi evidenciado que os teores deste nutriente na planta foram abaixo dos teores exigidos para esta cultura em todos os tratamentos que receberam as doses de CCA e LETE. Entretanto, os sintomas de deficiência, como baixo desenvolvimento das plantas e clorose observada nas pontas e margens das folhas mais velhas, foram constatadas somente nos tratamentos que receberam as doses de CCA com ausência de LETE, conforme pode ser visto na Figura 14. Desta forma, a deficiência de nitrogênio apresentou-se como um fator limitante para o desenvolvimento da

cultura, mesmo com a presença de altos níveis de fósforo e potássio adicionados ao solo pela CCA e LETE.

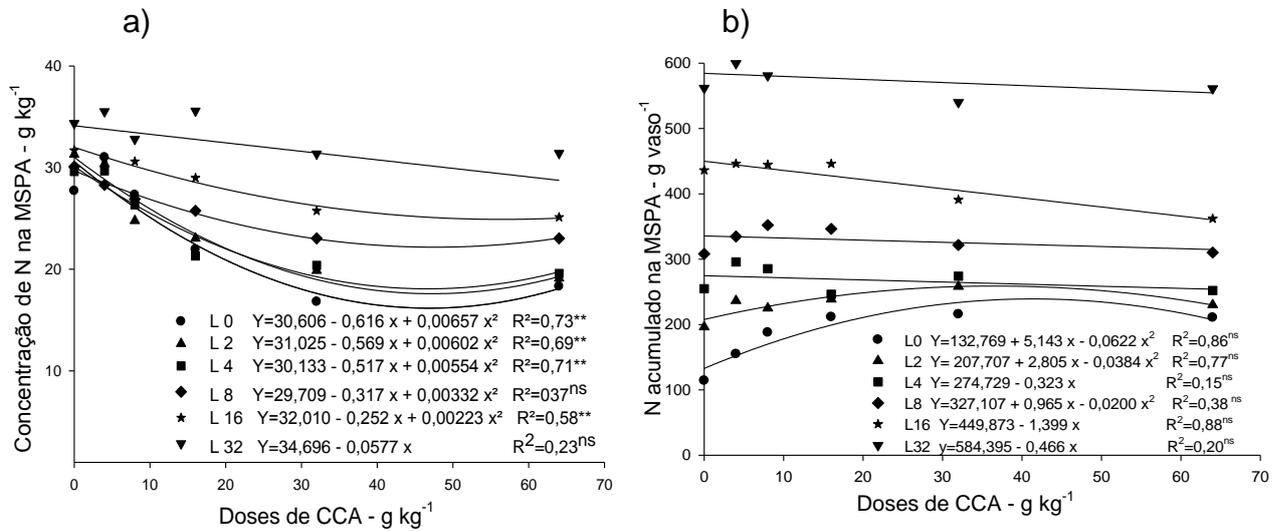


Figura 13 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Nitrogênio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.



Figura 14 – Sintomas de deficiência de nitrogênio nas plantas de milho que receberam dose zero de LETE e 64 g/kg de cinza de casca de arroz (CCA).

O efeito da CCA e do LETE na concentração do fósforo (P) foi significativo ($p < 0,01$) (Figura 15a). A cinza apresentou uma variação de 1,68 a 3,81 g kg⁻¹ na dose zero de lodo. O efeito da cinza se mostrou significativo até a dose 8 g kg⁻¹ de

lodo. Assim como a concentração, a cinza proporcionou o aumento sobre o P acumulado na planta (Figura 15b), entretanto seu efeito significativo se estendeu até a dose 16 g kg⁻¹ de lodo. Já nas doses de lodo com ausência da CCA, a aplicação do resíduo apresentou valores na concentração superiores encontrados nas doses de cinza com uma variação de 1,68 a 5,17 g kg⁻¹, com a aplicação de 0 e 32 g kg⁻¹ de LETE, respectivamente (Figura 15a). O P acumulado nessa dose seguiu os mesmos parâmetros da concentração, obtendo efeito significativo para a variável (Figura 15b).

O efeito da cinza pode estar relacionado com o P presente na sua composição e/ou pela interação entre o fósforo do solo e o silício presente na CCA (ISLABÃO et al., 2014). Nas doses mais altas de LETE, os teores de P aumentaram, anulando o efeito da CCA, o que pode estar associado à concentração de P no LETE (Tabela 2). Logo, estes dados demonstram que ambos os resíduos, LETE e CCA, são fontes de fósforo para as plantas e encontram-se acima do teor crítico de deficiência deste elemento exigida para o milho, de 2,9 g kg⁻¹ de material seco da parte aérea inteira (REUTER; ROBINSON, 1997).

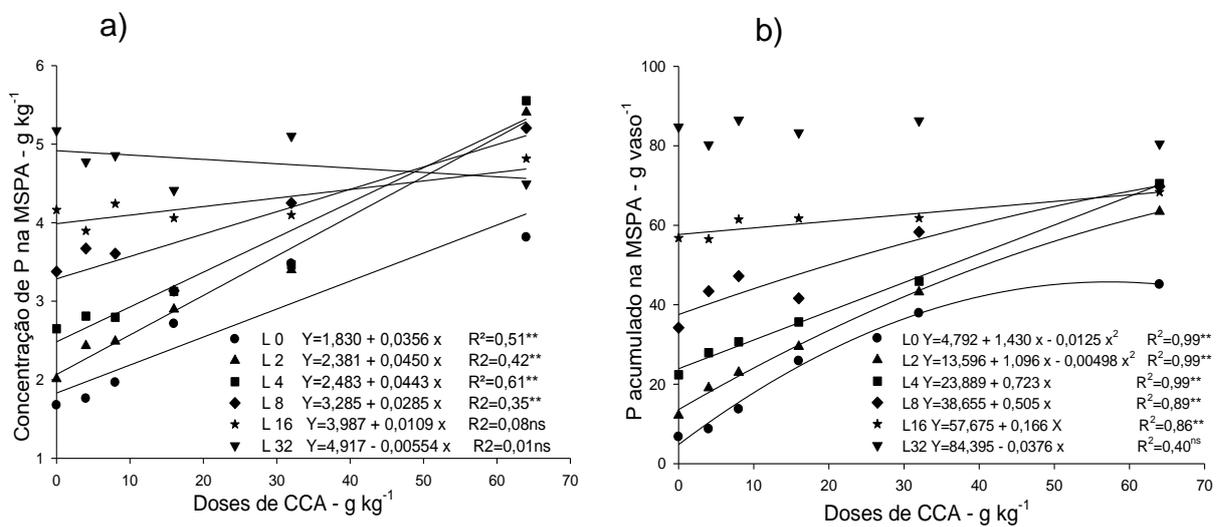


Figura 15 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Fósforo na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

A CCA aumentou a concentração de potássio (K) nas plantas dentro de todas as doses de LETE com exceção da dose zero na qual o efeito não foi significativo ($p > 0,01$) (Figura 16a). Logo, mesmo dentro desta dose de LETE a CCA forneceu K

para as plantas pois manteve a concentração do nutriente no tecido mesmo aumentando a produção de MSPA. Além disso, o K acumulado aumentou significativamente, não só dentro dessa dose mas em todas as outras (Figura 16b), inferindo que a cinza conseguiu suprir potássio para o desenvolvimento das plantas de milho. Com a maior dose de CCA (64 g kg^{-1}) combinada a maior dose de LETE (32 g kg^{-1}), constatou-se a máxima concentração de $74,03 \text{ g kg}^{-1}$ de K, duas vezes mais a concentração encontrada na testemunha, que foi de $39,01 \text{ g kg}^{-1}$ de K (Figura 16a). O lodo diminuiu a concentração de K no tecido na ausência de CCA, o que pode ser consequência da diluição do K nas plantas devido ao aumento da MSPA com a aplicação de LETE (Figura 16a), os teores variaram de $39,01$ a $17,18 \text{ g kg}^{-1}$ de K nas doses zero e 32 g kg^{-1} de lodo, respectivamente. Entretanto, ao analisar K acumulado na parte aérea, verificou-se um aumento significativo do nutriente, chegando ao valor máximo de $280,74 \text{ g vaso}^{-1}$ com aplicação de 32 g kg^{-1} de LETE e 0 g kg^{-1} de CCA, valor superior ao encontrado na testemunha de $161,54 \text{ g vaso}^{-1}$ (Figura 16b).

Com base nos dados, permite-se inferir que o potássio proveniente dos dois resíduos incorporados ao solo, principalmente da CCA, foi intensamente absorvido pelas plantas concordando com a afirmação de Primo et al. (2012), quando assinalam que o nitrogênio e o potássio são os elementos mais exigidos pela cultura do milho e, por isso, são extraídos em maior quantidade pelas plantas.

Segundo Reuter e Robinson (1997), o teor de potássio na parte aérea inteira das plantas de milho deve conter 35 g kg^{-1} , sendo assim verifica-se que, a partir dos dados obtidos, os tratamentos que receberam as doses de CCA o teor de potássio encontrado nas plantas cultivadas foi superior aos considerados adequados para a cultura do milho. Já nas doses que receberam o LETE, os teores se mantiveram abaixo, apenas sendo possível alcançar teores acima do teor crítico de deficiência com a combinação das doses de CCA. O lodo não é boa fonte de K e nas doses maiores deste resíduo, sem a cinza, o teor no tecido foi menor que o nível crítico.

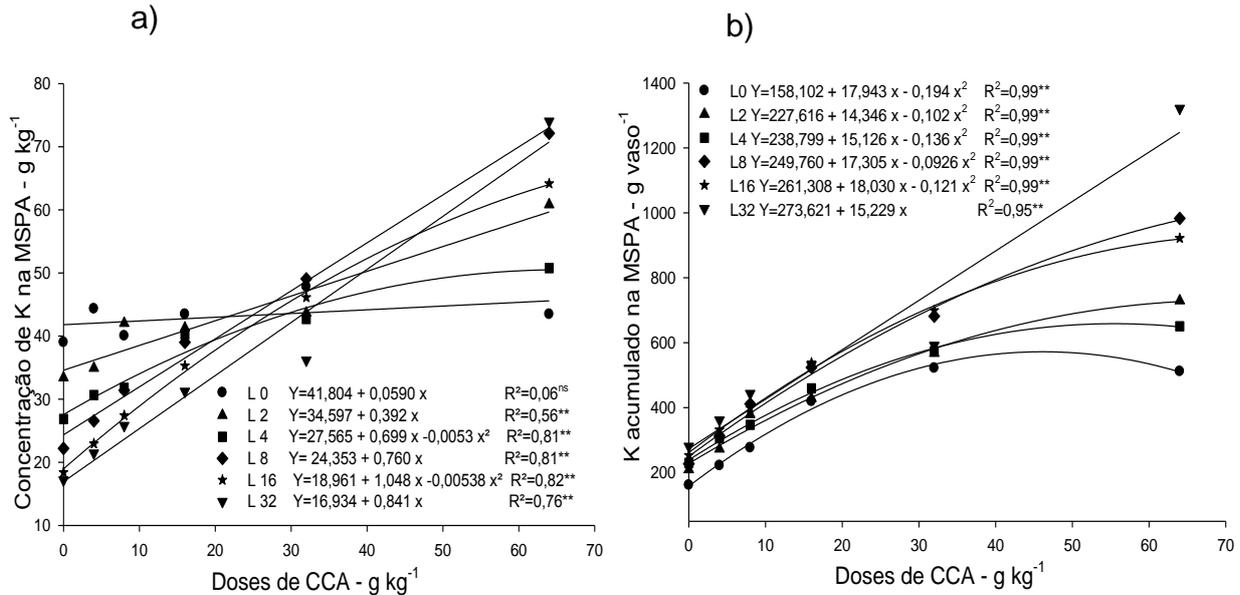


Figura 16 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Potássio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

4.4 Teor e acúmulo de cálcio e magnésio nas plantas

Houve interação significativa ($p < 0,01$) entre os resíduos somente para o Mg dentre as variáveis estudadas. A aplicação de doses crescentes de CCA ao solo resultou na diminuição dos teores de Ca e Mg no tecido das plantas de milho (Figura 17a). Para o Ca os tratamentos que receberam a incorporação das doses de CCA demonstraram efeito significativo e variaram de 6,08 a 4,54 g kg⁻¹ de Ca na planta com as doses 0 e 64 g kg⁻¹ de CCA, respectivamente. Ao analisar o Ca acumulado na planta, não se constatou diferença significativa nas mesmas doses (Figura 17b). Nos tratamentos que receberam a incorporação de LETE, constatou-se uma concentração de 5,85 g kg⁻¹ de Ca na planta na dose mais alta testada, não diferindo estatisticamente do tratamento testemunha, correspondente a 5,67 g kg⁻¹ de Ca (Figura 18a). Mas houve efeito significativo no Ca acumulado com aplicação das doses desse resíduo, os valores variaram de 44,35 a 97,30 g kg⁻¹ (Figura 18b).

Para a concentração de Mg nas plantas de milho, a aplicação de doses crescentes de CCA ao solo proporcionou uma diminuição significativa (Figura 17a). Verificou-se uma concentração na maior dose de CCA (64 g kg⁻¹), correspondente a 3,75 g kg⁻¹, quando equiparado aos teores de Mg nas plantas do tratamento

testemunha, equivalente a $9,96 \text{ g kg}^{-1}$. O mesmo se repetiu para o Mg acumulado, houve uma diminuição significativa provocado pelo aumento da dose de CCA, chegando a valores de $102,98$ a $51,79 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 17b). Aplicação das doses de LETE proporcionou efeito contrário da CCA, houve um aumento significativo na concentração do nutriente (Figura 18a), os valores obtidos foram de $5,75$ a $8,14 \text{ g kg}^{-1}$ de Mg na planta, com as doses 0 e 32 g kg^{-1} de LETE, respectivamente. Esse aumento foi constatado também para o Mg acumulado, atingindo valor máximo acumulado de $138,75$ com a maior dose de LETE aplicado (Figura 18b).

Sandrini (2010), verificou que a aplicação das doses $2,2$, $4,4$, $8,8$, $13,0$ e $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de CCA não influenciaram significativamente o aumento dos teores de Ca e Mg na MSPA do milho, entretanto, os teores dos dois nutrientes diminuíram com o aumento das doses. Os teores de Ca e Mg variam de $6,31$ a $5,70 \text{ g kg}^{-1}$ e $4,86$ a $3,72$ nas doses $2,2$ e $17,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de cinza, respectivamente.

Em todos os tratamentos com CCA e LETE em sua composição, foram determinados valores de Ca e Mg na parte aérea inteira, acima dos teores críticos exigidos pela cultura do milho, que é de 3 g kg^{-1} para o Ca, e $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ para o Mg, no material seco (REUTER e ROBINSON, 1997).

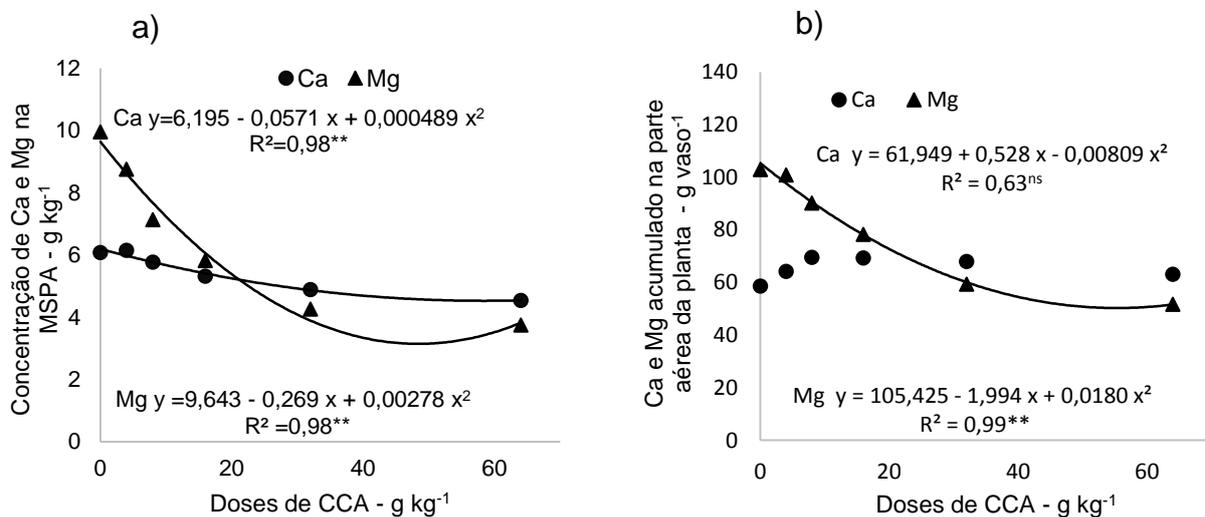


Figura 17 - Concentração (a) e acúmulo (b) de Cálcio e Magnésio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

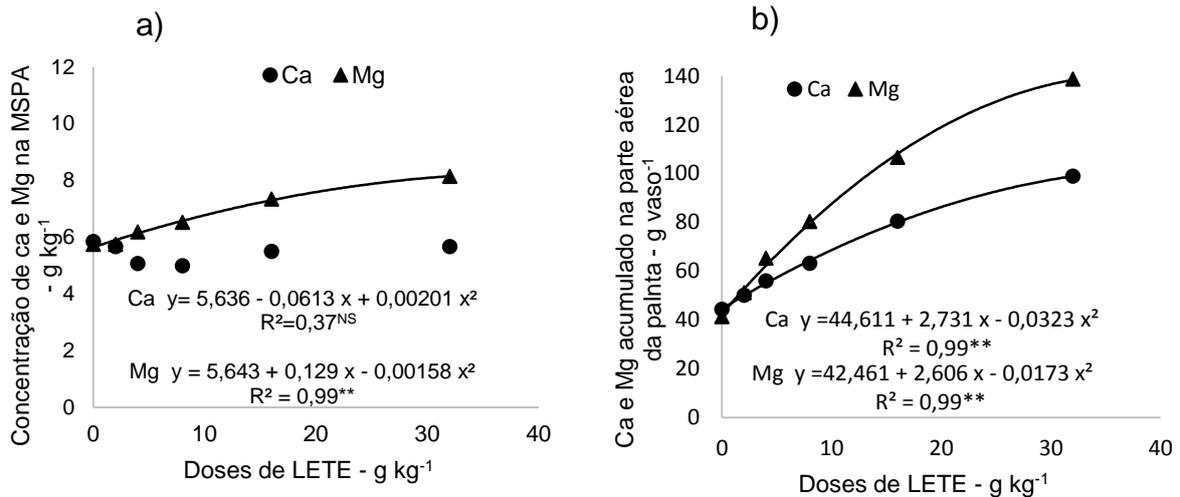


Figura 18 - Concentração (a) e acúmulo (b) de Cálcio e Magnésio na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. **^{ns}** Não Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

4.5 Teor e acúmulo de ferro, manganês, cobre e zinco nas plantas

Não houve interação entre a CCA e o LETE ($p > 0,01$) para as variáveis estudadas, com exceção do zinco (Zn). Os teores médio de zinco diminuíram significativamente com a CCA (Figura 19a), chegando ao valor de $48,52\ mg\ kg^{-1}$ na maior dose de cinza testada. Enquanto que, nas doses de LETE, os teores médio desse nutriente aumentaram linearmente (Figura 20a), atingindo teor máximo de $110,67\ mg\ kg^{-1}$ na maior dose aplicada do resíduo. O Zn acumulado nas plantas de milho seguiram os mesmos parâmetros da concentração de ambos resíduos (Figura 19b e 20b).

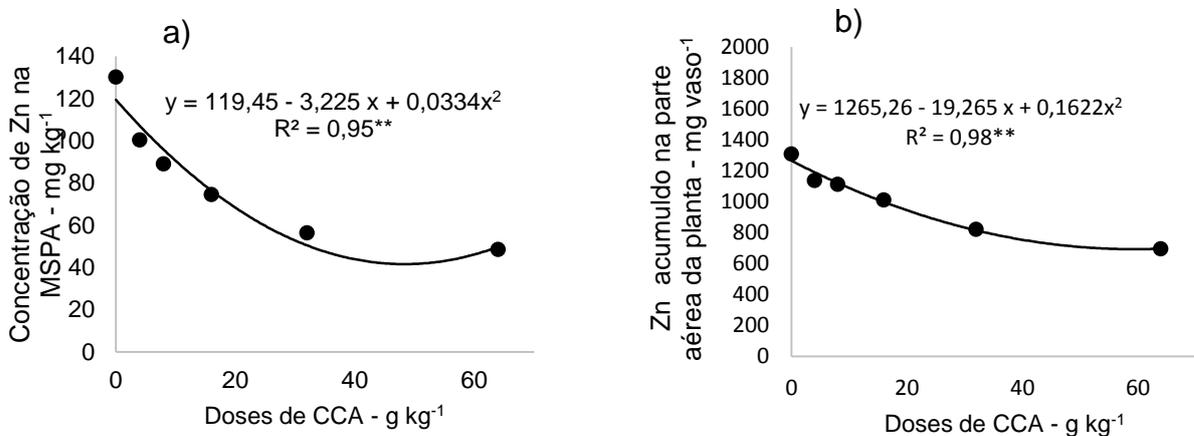


Figura 19 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Zinco (Zn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. **^{ns}** Não Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

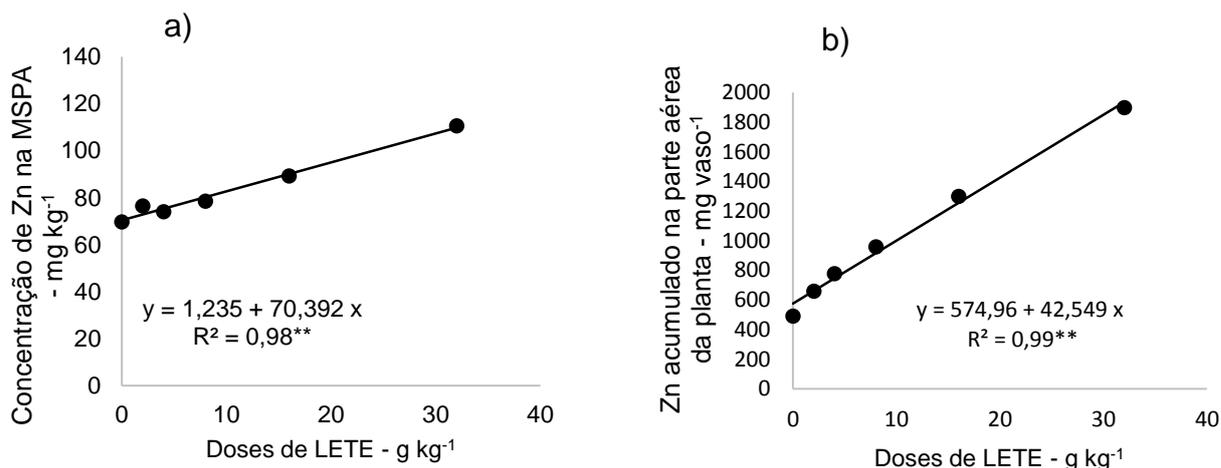


Figura 20 – Concentração (a) e acúmulo (b) de Zinco (Zn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Para o ferro (Fe) o aumento das doses de CCA ocasionou um decréscimo significativo na concentração (Figura 21a) e no acúmulo (Figura 21b) do elemento. Os teores médio da concentração de Fe obtidos foram correspondente a 139,44 mg kg⁻¹ na dose mais alta de CCA (64 g kg⁻¹), quando equiparado aos teores de Fe do tratamento testemunha, equivalente a 407,67 mg kg⁻¹ (Figura 21a). Em relação ao acúmulo do nutriente nas plantas de milho, os valores médio variaram de 3.502,7 a 1.872,7 mg vaso⁻¹ nas doses 0 e 64 g kg⁻¹ de cinza, respectivamente (Figura 21b). Nos tratamentos que receberam o LETE, a concentração de Fe também diminuiu significativamente ($p > 0,01$) (Figura 21c), entretanto, o efeito desse resíduo foi menor que a cinza, o mesmo não se repetiu para o Fe acumulado (Figura 21d), ocorreu um aumento da quantidade absorvida do elemento pelas plantas conforme o aumento das doses do resíduo, alcançando na médio dos tratamentos, valor máximo absorvido de 1.899,6 mg vaso⁻¹ de Fe, obtido na dose mais alta de LETE (Figura 21d).

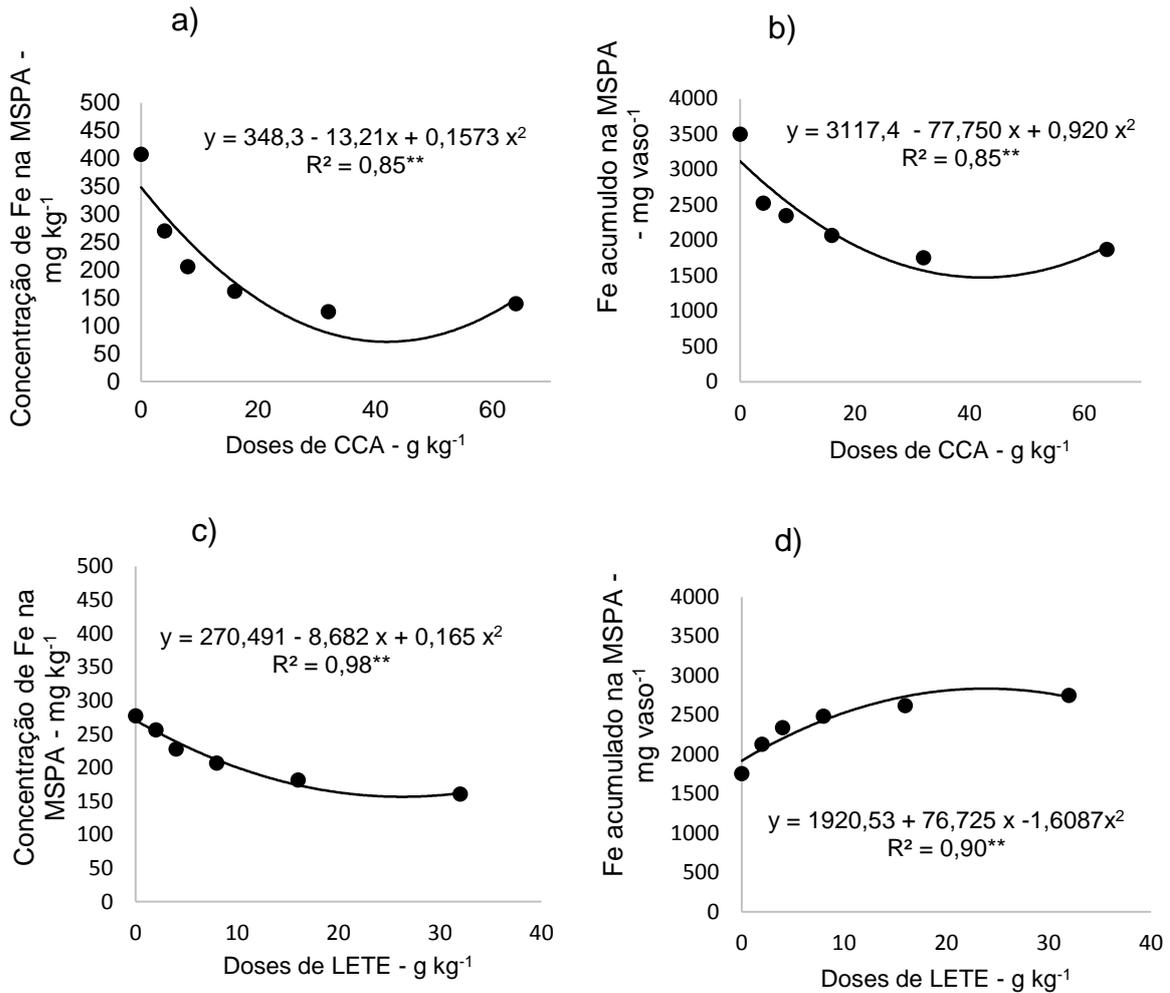


Figura 21 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Ferro (Fe) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). **Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Para o Mn houve efeito significativo na concentração apenas com a aplicação da CCA (Figura 22a). Nos valores médio da concentração do nutriente, a CCA proporcionou na maior dose o equivalente a 50,11 mg kg⁻¹, valor bem abaixo dos 187,24 mg kg⁻¹ constatados na testemunha, dose zero. O Mn acumulado nesses tratamentos variou de 1773,5 a 652,8 g vaso⁻¹ nas doses 0 e 64 g kg⁻¹ de cinza, respectivamente (Figura 22b). Não houve efeito significativo na concentração de Mn com aplicação do lodo (Figura 22c). Entretanto, a adição do resíduo ocasionou o aumento do Mn acumulado nas plantas de milho, alcançando na média dos tratamentos, valor máximo de 1819,6 mg vaso⁻¹ na maior dose de lodo testada (Figura 22d).

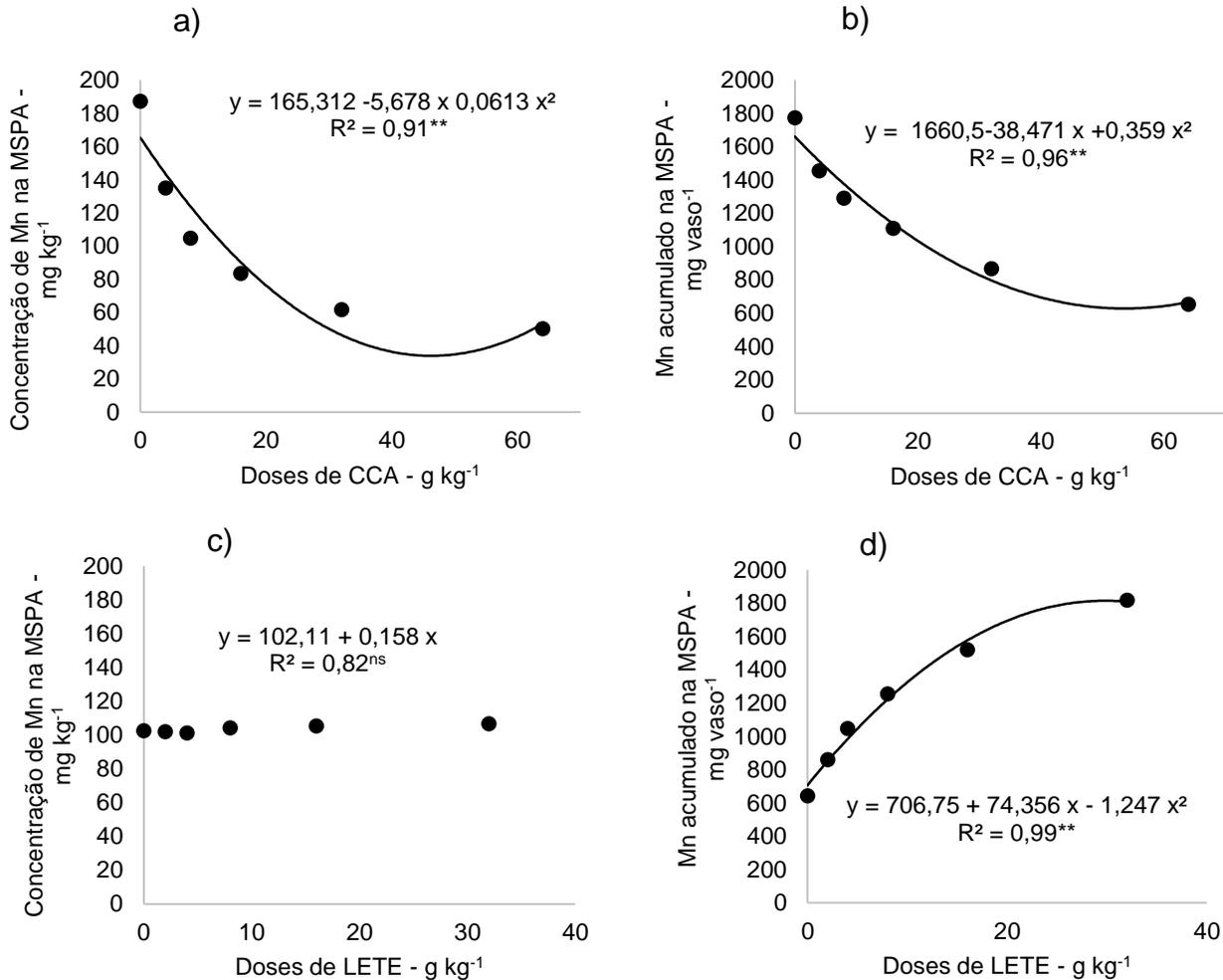


Figura 22 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Manganês (Mn) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). ^{**}Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

A aplicação da CCA e do LETE proporcionaram efeito significativo na concentração e no acúmulo do cobre (Cu) (Figura 23a, c). Os valores médio de Cu na concentração variaram entre 5,42 a 2,50 mg kg⁻¹, nas doses 0 e 64 g kg⁻¹ de cinza, respectivamente (Figura 23a). No Cu acumulado, os valores médio variaram de 51,81 a 33,15 mg vaso⁻¹, nas mesma doses da concentração (Figura 23b). Em relação ao LETE, inicialmente a concentração sofreu uma leve diminuição com as doses do resíduo, entretanto na dose mais alta a concentração se elevou chegando a 4,15 mg vaso⁻¹, comparado ao valor de 3,96 mg vaso⁻¹ encontrado na testemunha, dose zero (Figura 23c). Já o Cu acumulado apresentou uma resposta linear com o aumento do resíduo (Figura 23d).

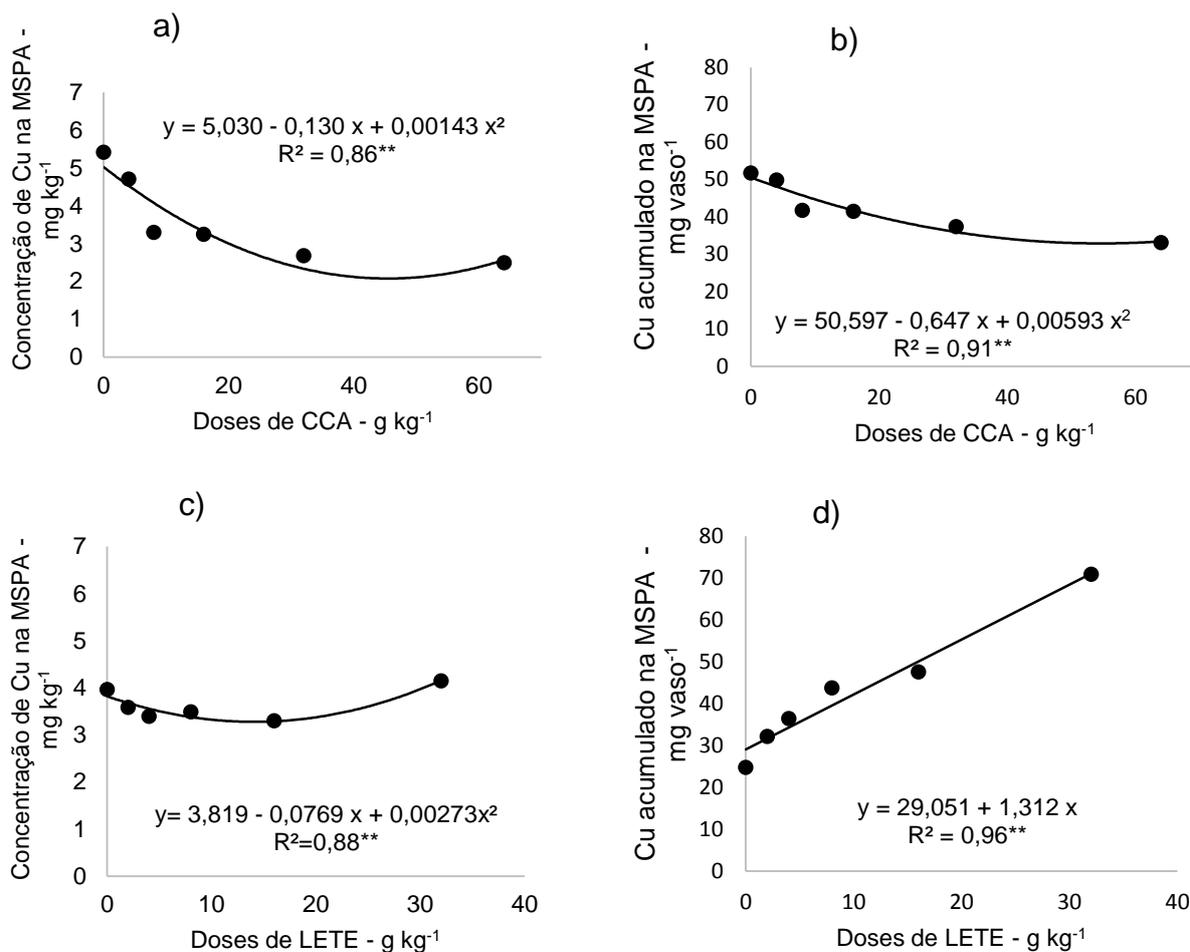


Figura 23 – Concentração (a, c) e acúmulo (b, d) de Cobre (Cu) na Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). ******Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F. **ns** Não Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste F.

Conforme os autores Reuter e Robinson (1997), com exceção do Cu, todos os nutrientes obtiveram os teores acima dos considerados críticos para deficiência na cultura do milho (parte aérea inteira), os teores críticos para o Zn, Mn e Fe são respectivamente 16; 50 e 50 mg kg⁻¹. Para o Cu o nível crítico é de 5 mg kg⁻¹, com a aplicação da CCA e o LETE os teores permaneceram abaixo desse valor de referência.

A resposta da cultura à CCA como fonte de macronutrientes está de acordo com observações experimentais prévias, ou seja, como fonte de fósforo e potássio, mas carente em nitrogênio. Este foi fornecido pelo LETE, mas em quantidade muito menor do que a observada por vários autores, entre os quais Nascimento et al. (2004), Da Ros et al (1993) e Berton et al. (1989). O suprimento de N pelo LETE tem sido usado como referência para estabelecer as doses máximas de LETE a serem aplicadas de modo a não contaminar o solo com excesso de N. Tais doses raramente ultrapassam 5 g kg^{-1} (equivalente a 10 Mg ha^{-1}). No presente trabalho, mesmo com 32 g kg^{-1} as plantas atingiram apenas o nível crítico de N, o que significa que doses maiores poderiam ter sido utilizadas e a produção de matéria seca teria aumentado. Como o teor de N total do LETE utilizado é semelhante à média de N em outros LETE utilizados por vários pesquisadores, é provável que o baixo pH do solo tratado com o lodo neste trabalho tenha limitado a mineralização do N. O potássio também pode ter sido limitante no lodo utilizado. Com o aumento da produção de material vegetal promovido pelo LETE, o teor de K nas plantas diluiu para valores muito aquém do nível crítico. Se o lodo tivesse mais N, o que acarretaria um crescimento maior das plantas o K poderia ter sido limitante e aí a resposta das plantas à CCA teria sido maior dentro dos níveis mais elevados de LETE, pois forneceria potássio.

Assim, pode-se inferir que embora o LETE possa de fato suprir o N, carente na CCA, ela supre também o P, de modo que, pelo menos em solo bem suprido de K, não há vantagem em misturar CCA ao LETE para suprir estes macronutrientes, ou seja, aquilo que se busca completar na CCA usando o LETE pode ser atendido, mas ao usar o LETE a CCA pode ser dispensada.

Por outro lado, se no suprimento de macronutrientes pode não haver vantagem de misturar CCA ao LETE, na atenuação de eventuais níveis tóxicos de metais pesados pode haver vantagem. Embora isto não tenha sido avaliado neste experimento, os efeitos verificados nos micronutrientes, especialmente no Cu e Zn, levam a crer que a CCA pode atenuar tais efeitos. O lodo aumentou a absorção destes dois micronutrientes pelas plantas, enquanto a CCA a diminuiu. Estes efeitos na absorção estão relacionados à solubilidade destes elementos no solo. A diminuição de solubilidade de Cu e Zn no solo pela CCA pode ser consequência da alta adsorção destes elementos pela CCA (CHAVES et al., 2009; FERROZE et al, 2011).

5. CONCLUSÕES

O lodo de estação de tratamento de esgoto pode suprir o nitrogênio, que é carente na cinza de casca de arroz, mas é também fonte de fósforo e supre pouco potássio.

Em solo que não for deficiente em potássio, ao aplicar dose de lodo de estação de tratamento de esgoto para suprir o nitrogênio, o fósforo também será suprido, dispensando o uso de cinza de casca de arroz como fonte de fósforo e potássio.

O lodo de estação de tratamento de esgoto aumenta a disponibilidade de zinco e cobre enquanto a cinza de casca de arroz diminui a disponibilidade dos mesmos.

A cinza de casca de arroz diminui a toxidez de Al porque aumenta o pH do solo enquanto o lodo de estação de tratamento de esgoto diminui a toxidez de Al mesmo diminuindo o pH, provavelmente devido à complexação do Al pela matéria orgânica do lodo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMICK, J.A.; Purification of Rice Hulls as a Source os Solar Grade Silicon for Solar Cells. *Journal Electrochemistry Society*, v. 129, n. 4, 1982, p. 864 – 866.

ANDREOLI, C. V. et al. *Alternativas de uso de resíduos do saneamento*. Rio de Janeiro: Abes, 2006. 417 p.

ANTOLIN, M. C.; PASCUAL, I.; GARCIA, C.; POLO, A.; SANCHEZ-DIAZ, M. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 94, n.2/3, p. 224-237, 2005.

AYRES, A.; SANTOS, P. B.; SOUZA, O. T.; ALVIM, A. M. Indústria Arrozeira no Rio Grande do Sul: notas sobre a localização da atividade e a estrutura produtiva. In: 5º Encontro de economia gaúcha. Porto Alegre, 2010.

BEHLING, M.; DIAS, F. C.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; OLIVEIRA, C.; MAZUR, N. Nodulação, acúmulo de nitrogênio no solo e na planta, e produtividade de soja em solo tratado com lodo de estação de tratamento de resíduos industriais. *Bragantia*, Campinas, v. 68, n.2, p. 453-462, 2009.

BERTON, R. S.; CAMARGO, O.A. VALADARES, J. M. A. Absorção de nutrientes pelo milho em resposta à adição de lodo de esgoto a cinco solos paulistas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. Campinas, v.13, p.187–192, 1989.

BETTIOL, W.; FERNANDES, S. A. P. Efeito do lodo de esgoto na comunidade microbiana químicos do solo. *Boletim Técnico 24*. Jaguariúna, São Paulo, 2004, 6p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto. Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, São Paulo, 2006. p.153-162.

BETTIOL, W.; GHINI, R. Impacts of sewage sludge in tropical soil: a case study in Brazil. *Applied and Environmental Soil Science*, New York, v. 2011, n. 1, p. 1-11, 2011.

BOEIRA, R. C.; SOUZA, M. D.; Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio, pH e densidade de um Latossolo após três aplicações de lodos de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. vol.31, n.3, p. 581-590, 2007.

BONINI, C. S. B. et al. Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental*. Campina Grande, PB, v.19, n.4, p.388-393, 2015.

CHANG, F., et al.; Hydrogenation of CO₂ Over Nickel Catalysts Supported on Rice Husk Ash Prepared by Ion Exchange. *Applied Catalysis A: General*. vol. 209, p. 217-227, 2001.

CHAVES, T. F. et al.; Uso da cinza da casca do arroz (CCA) obtida da geração de energia térmica como adsorvente de Zn (II) em soluções aquosas. *Química Nova*, vol.32, n.6, 1378 – 1383, 2009.

CHUEIRI, W. A.; SERRAT, B. M.; BIELE, J. FAVARETTO, N. Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo. *Revista brasileira eng. agrícola ambiental*. vol.11, n.5, pp. 502-508, 2007.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Central de informações agropecuárias. Levantamento de grãos da safra 2013/2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acesso em junho de 2014.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 375. Critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Diário Oficial da União, Brasília, 2006, DF. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em junho de 2014.

COSTA, V. L.; MARIA, I. C.; CAMARGO, O. A.; GREGO, C. R.; MELO, L. C. A. Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, p.287-93, 2014.

DA ROS, C. O.; AITA, C.; CERETTA, C. A. & FRIES, M. R. Lodo de esgoto: efeito imediato no milho e residual na associação aveia-ervilhaca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas. v. 17, p. 257-261, 1993.

DAMASCENO, S.; CAMPOS, J.R.; Caracterização de Lodo de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitários para Uso Agrícola, 2006. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/peru/bratar035.pdf>. Acesso em: 16 de abril de 2015.

DELLA V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Caracterização da cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratário de sílica. *Química Nova*, 24(6): 778-782, 2001.

DELLA V. P.; KUHN, I.; HOTZA, D. Reciclagem de resíduos Agroindustriais: cinza de casca de arroz como fonte alternativa de sílica. *Cerâmica Industrial*, 10(2):22-25, 2005.

DONEGA, M. A.; VOLK, L. B.; NOLLA, A.; GAVIOLLI, T. O. Avaliação do uso de casca de arroz carbonizada no desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Gramado – RS, 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de Métodos de Análise de Solo. 2 ed. Rio de Janeiro, p.212, 1997.

FEROZE, N. et al. Kinetic and equilibrium studies for Zn (II) and Cu (II) metal ions removal using biomass (rice husk) ash. *J. Chem. Soc. Pak.*, vol.33, n.2, p.139, 2011.

FERREIRA, T.N.; SCHWARZ, R.A.; STRECK, E.V. Solos: manejo integrado e ecológico - elementos básicos. Porto Alegre: EMATER, p.95, 2000.

GAVIOLLI, T. O.; VOLK, L. B.; NOLLA, A.; DONEGA, M. A. Correção da acidez do solo, fertilização e crescimento do milho submetido à aplicação de casca de arroz carbonizada. In: XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Gramado-RS, 2007.

GODOY, L. C. A logística na destinação do lodo de esgoto. Revista Científica On-line Tecnologia, Gestão, Humanismo. V2, n.1, novembro, 2013.

GOMES, S B. V.; NASCIMENTO, C. W. A. BIONDI, C. M. Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental, vol.11, n.5, pp. 459-465, 2007.

GONÇALVES, M. R. F.; BERGMANN, C. P. Isolantes Térmicos de Cinza de Casca de Arroz: Obtenção e Correlação de suas Propriedades com a Microestrutura. Cerâmica Industrial, v.11, p.38-43, 2006.

GONÇALVES, F. T. A. Dinâmica do nitrogênio em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com café. 2005. Dissertação (Mestrado em Gestão dos Recursos Agroambientais) – Instituto Agronômico de Campinas, 2005.

HOFFMANN, R.; JAHN, S. L.; BAVARESCO, M.; SARTORI, T. C. Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte. Universidade Federal de Santa Maria – Centro de Tecnologia. Santa Maria, RS, 2007.

HOFFMANN, R. B. Potencial de Uso de Biossólido para Fins de Recuperação de Áreas degradadas. 2012. 93f. Tese (Doutor em Ciências) Universidade Federal de Viçosa – Viçosa, RS.

HOUSTON, D.F. Rice, chemistry and technology. American Association of Cereal Chemical. St. Paul. Minnesota, USA, p. 301-351, 1972.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/estProdAgr_201309.pdf. Acesso em abril de 2015.

ISLABÃO, G. O. Uso da cinza de casca de arroz como corretivo e condicionador do solo. 2013. 80f. Tese (Doutorado em Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

ISMAEL, HANAFI, et al. The Effect of Multifunctional Additive in White Rice Husk Ash Filled Natural Rubber Compounds. *European Polyme Journal*. Vol. 35, 1429-1437, 1999.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DE ARROZ – IRGA, Departamento comercial e industrial – sessão de política setorial – Arroz Irrigado no RS – área, produção e rendimento, 2008, disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/inicial>. Acesso em maio de 2014.

JOSHUA, W. D.; MICHALK, D. L.; CURTIS, I. H.; SALT, M.; OSBORNE, G. J. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge (biosolids) in a sheep grazing study, Australia. *Geoderma*, Amsterdam, v. 84, n. 1/3, p. 135-156, 1998.

KIDD, P. S.; DOMÍNGUEZ-RODRÍGUEZ, M. J.; DÍEZ, J.; MONTERROSO, C. Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge. *Chemosphere*, Oxford, v. 66, n. 8, p. 1458-1467, 2007.

KIELING, A. G. Influência da Segregação no Desempenho de Cinzas de Casca de Arroz como Pozolanas e Material Adsorvente. 131f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UNISINOS.

LOURENÇO, R.S. Efeito da aplicação do lodo de esgoto nos teores solúveis e totais de elementos do solo sob o sistema de produção de Bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 38, p. 39-65, jan./jun. 1999.

MACHADO, M.D. & LUZ, P.B. Desenvolvimento de plantas de arroz de terras altas em função de doses da cinza da casca de arroz. Universidade do Estado de Mato Grosso, 2009.

MALAVOLTA, E. Corretivos cálcicos, magnesianos e calco-magnesianos. Manual de química agrícola: adubos e adubação. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.

MELO, W. J.; MARQUES, M.O.; MELO, V. P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: TSUTIYA, M.T.; COMPARINI, J.B.; ALEM SOBRINHO, P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. de C. T. de; MELFI, A. J.; MELO, W. J. de; MARQUES, M.O. (Ed.). Biossólidos na Agricultura. São Paulo: SABESP, p.289-363, 2001.

MELO, W. J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G.; CHELLI, R.A.; LEITE, S.A.s. Efeitos de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações de matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Ciência do solo, v.18, p.449-455, 1994.

MONTANHER, S. F. Utilização da biomassa de bagaço de laranja como material sorvente de íons metálicos presentes em soluções aquosas. Tese (Doutor em Química). Universidade Estadual de Maringá, 2009, PR.

MOURA, J.B. et al. Produtividade do feijoeiro submetido à adubação nitrogenada e inoculação com *Rhizobium Tropicum*. Global Science and Technology, v. 2, n.3, p. 66-71, set./dez. 2009.

NASCIMENTO, C. W. A. do; BARROS, D. A. S.; MELO, E. E. C. de; OLIVEIRA, A. B. de. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.28, n.2, p.385-392, 2004.

NASCIMENTO, A. L. et al. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. Biosci. J., Uberlândia, v. 30, n. 1, p. 146-153, 2013.

NOLLA, A.; VOLK, L. B. S.; MUNIZ, A. S.; SILVA, T. R. B. Correção da acidez do solo em profundidade através do uso de carbonatos, silicatos e casca de arroz em lisímeros. Revista cultivando o saber, 3(2):1-8, 2010.

OLIVEIRA, L. B. de et al. Características químicas do solo e produção de biomassa de alface adubada com compostos orgânicos. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental*. vol.18, n.2, pp. 157-164, 2014.

PALMA, I. P.; NOLLA, A.; VOLK, L. B.; GAVIOLLI, T. O.; SANDER, G. Crescimento de plantas de milho em um latossolo arenoso adubado com cinza de casca de arroz e duas fontes de nitrogênio. Disponível em: http://www.fundaçãoaraucaria.org.br/projetos/projetos09-008/13391_Anais.pdf. Acesso em agosto de 2014.

POGGIANI, F.; GUEDES, M. C. & BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: I. Reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W. & CAMARGO, O. A. *Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto*, Jaguariúna, SP: EMBRAPA Meio Ambiente, p. 163-178, 2000.

PAULETTO, E. A.; NACHTIGALL, G. R.; GUADAGNIN, C. A. Adição de cinza de casca de arroz em dois solos do município de Pelotas, RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 14:255 – 258, 1990.

PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto. *Revista Liberato*. V.11, n.16, p. 89-188, 2010.

PINTO, M. A. B.; VAHL, L. C.; ISLABÃO, G. O.; TIMM, L. C. Casca de arroz queimada como corretivo de acidez do solo. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, v.32, 2009. Fortaleza: SBCS, 2009.

PIRES, A. M. M. *Uso Agrícola do Lodo de Esgoto: Aspectos Legais*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006.

PIRES, A. M. M.; ANDRADE, C. A. *Recomendação de dose de lodo de esgoto: a questão do nitrogênio*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2014.

POUEY, M.T.F. Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. 2006. 345f. Tese (Doutora em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

PRADO, A. K.; CUNHA. M. E. T. Efeito da Aplicação de Lodo de Esgoto e Curtume nas Características Físico-Químicas do Solo e na Absorção de Nitrogênio por Feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*). Unopar Cient. Exatas Technol., Londrina, v. 10, 1, p. 37-41, Nov. 2011

PRIMO, D. C.; Menezes, R. S. C.; da Silva, T. O.; Garrido, M. S.; Cabral, P. K. T. Contribuição da adubação orgânica na absorção de nutrientes e na produtividade de milho no semiárido paraibano. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.7, p.81-88, 2012.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. & FURLANI, A. M. C. Boletim Técnico 100. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 285p. 1997.

REGO, J. H. S. Viabilidade Técnica da Utilização da Cinza de Casca de Arroz produzida sem controle da temperatura como adição mineral ao cimento. 2001. 200f. Dissertação (Mestrado) – CME/UFG, Goiânia.

REUTER, D. J.; J. B. ROBINSON. Plant Analysis: An Interpretation Manual. 2 ed . CSIRO Publishing. Austrália, p. 110 – 124, 1997.

RICCI, A. B.; PADOVANI, V. C. R.; PAULA JÚNIOR, D. R. Uso de lodo de esgoto estabilizado em um solo decapitado: II - Atributos químicos e revegetação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.34, p.543- 551, 2010.

RODRIGUES, B. R.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do Bioma Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, p.73-80, 2007.

ROWELL, D.M.; PRESCOTT, C.E. & PRESTON, C.M. Decomposition and nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: Relationship with initial chemistry. *J. Environ. Qual.*, 30:1401-1410, 2001.

SAMPAIO, T. F. et al. Lodo de esgoto na recuperação de áreas degradadas: efeito nas características físicas do solo. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. vol.36, n.5, p. 1637-1645, 2012.

SANDER, G.; VOLK, L.B.S.; NOLLA, A.; GAVIOLLI, T.O.; PALMA, I.P. Sistema radicular de milho cultivado em latossolo arenoso adubado com cinza de casca de arroz e duas fontes de nitrogênio. In: FERTBIO, desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental, 2008, Londrina. Anais. Londrina: SBCS, 2008

SANDRINI, W. C. Alterações químicas e microbiológicas do solo decorrentes da adição de cinza de casca de arroz. 2010. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

SANTIN, M. J. & VAHL, L. C. Aproveitamento da cinza da casca de arroz como corretivo da acidez e da fertilidade do solo. Relatório CNPQ – Processo 11.3006/83. AG,1985. 20 p.

SANTOS, S. Estudo da viabilidade de utilização de cinza de casca de arroz residual em argamassas e concretos. 1997. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SCHIAVONI, E. A.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; COSTA, F. G. Influence of organic-mineral fertilization of an oxisol on soil chemical properties and *Bracharia brizantha* production. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.35, p.2219-2226, 2011

SILVA, E. M. B.; SANTOS, C. C.; VIELA, M. O. Adubação com cinza vegetal no cultivo de mucuna preta em latossolo do cerrado. *Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, v.9, n.17; p.33

SILVA, F. F.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; MUNIZ, A. S.; FERREIRA, R. C. Aplicação de cinza da casca de arroz e de água residuária de fecularia de mandioca na cultura de aveia. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, 1(1):25-36, 2008.

SIMONETE, M. A.; KIEHL, J. de C.; ANDRADE, C. A.; TEIXEIRA, C. F. A.; Efeito do lodo de esgoto em um Argissolo e no crescimento e nutrição de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol.38, n.10, pp. 1187-1195. ISSN 1678-3921, 2003.

SOUZA, M.R.F. Uso do lodo de curtume como fonte de nutrientes em plantas forrageiras. Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Escola de Veterinária da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

SOUZA, M.D. de. et al. Atributos físicos e químicos de área degradada tratada com lodo de esgoto. *Boletim Técnico 21*. Jaguariúna, São Paulo, 2011, RS.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BIASSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análises de Solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Departamento de Solos - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 174 p, 1995.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Características biológicas do solo indicadoras de qualidade após dois anos de aplicação de biossólido industrial e cultivo de milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31:1173-1184, 2007.

TSADILAS, C.D.; MATSI, T.; BARBAYIANNIS, N. & DIMOYIANNIS, D. Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Comm. Soil.Sci. Plant. Anal.*, 26:2603-2619, 1995.

ZIMMERMANN, S.; FREY, B. Soil respiration and microbial properties in an acid forest soil: effects of wood ash. *Soil Biology & Biochemistry*, Elmsford, p. 1-11, 2002.

APÉNDICE

Apêndice A - Unidades experimentais com 12 plantas de milho por vaso, após 10 dias da germinação (08/11/2014)



Apêndice B - Unidades experimentais com 6 plantas de milho por vaso, aos 20 dias da germinação (29/11/2014)



Apêndice C - Resposta das plantas de milho do T37- 0 g/kg CCA, T38 - 4 g/kg CCA, T39 - 8 g/kg CCA, T40 -16 g/kg CCA, T41 - 32 g/kg CCA e T42 - 64 g/kg CCA combinadas com a dose 0 g/kg de LETE do dia 21 de novembro de 2014



Apêndice D - Resposta das plantas de milho do T67 - 0 g/kg CCA, T68 - 4 g/kg CCA, T69 - 8 g/kg CCA, T70 -16 g/kg CCA, T71 - 32 g/kg CCA e T72 - 64 g/kg CCA combinadas com a dose 32 g/kg de LETE do dia 21 de novembro de 2014



Apêndice E - Resposta das plantas de milho do T73 e T108 com 0 e 64 g/kg de CCA combinadas com a dose 0 e 32 g/kg de LETE do dia 21 de novembro de 2014



Apêndice F - Resposta das plantas de milho do T78 e T108 com 64 g/kg de CCA combinadas com a dose 0 e 32 g/kg de LETE do dia 21 de novembro de 2014



Apêndice G – Valores médios de N, P, K, Ca e Mg do solo em função da aplicação de doses de cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto

Tratamento	N-NH ₄	N-NO ₃	N mineral	P	K	Ca	Mg
g/kg	-----mg/kg-----			-----mmol/kg-----			
C0L0	6,29	12,63	18,92	6,2	73,6	15,35	27,22
C4L0				8,5	85,8	14,83	29,22
C8L0				12,8	103,8	14,98	28,58
C16L0	8,29	24,39	32,67	18,3	125,6	15,14	29,93
C32L0				36,5	169,9	16,29	32,85
C64L0	2,41	27,95	30,35	68,6	313,7	16,23	32,47
C0L2	5,25	25,92	31,17	26,0	75,2	16,44	31,01
C4L2				16,8	93,8	16,91	31,79
C8L2				24,5	101,8	16,76	31,46
C16L2	15,06	19,31	34,37	27,2	124,0	17,33	32,00
C32L2				36,0	172,5	18,01	33,42
C64L2	6,07	24,91	30,98	77,2	320,9	17,54	34,34
C0L4	10,29	31,10	41,39	25,0	80,3	16,55	31,52
C4L4				21,6	96,4	17,12	28,51
C8L4				20,0	112,8	18,79	34,52
C16L4	10,46	29,33	39,79	33,3	142,3	18,06	34,05
C32L4				48,9	165,0	19,47	36,25
C64L4	13,97	29,03	43,00	83,4	335,9	19,06	37,81
C0L8	8,15	35,07	43,22	29,0	86,8	19,63	35,68
C4L8				29,4	90,9	19,00	34,11
C8L8				35,5	103,1	19,00	36,79
C16L8	16,44	37,42	53,86	38,6	122,1	19,63	34,69
C32L8				64,3	178,3	20,47	39,27
C64L8	15,73	35,19	50,92	79,5	291,6	20,05	38,22
C0L16	5,73	43,37	49,10	55,4	74,8	22,24	35,40
C4L16				63,1	90,3	22,29	37,54
C8L16				55,3	105,6	22,76	36,05
C16L16	8,88	46,53	55,41	65,7	117,2	23,55	37,23
C32L16				100,5	156,4	21,46	38,32
C64L16	4,99	41,27	46,26	109,1	320,1	22,03	40,59
C0L32	11,42	61,20	72,62	76,7	76,4	26,16	36,45
C4L32				84,4	88,3	25,06	35,94
C8L32				85,8	104,4	24,17	35,81
C16L32	12,52	85,26	97,78	120,1	125,6	23,28	36,11
C32L32				173,6	171,5	24,69	37,57
C64L32	9,76	93,74	103,50	160,5	296,3	24,85	41,51

C = cinza de casca de arroz; **L** = lodo de estação de tratamento de esgoto

Apêndice H – Valores médios de Si, Na, Mn, Fe, Cu e Zn do solo em função da aplicação de doses de cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto

Tratamento	Si	Na	Mn	Fe	Cu	Zn
g/kg	----- mg/kg -----					
C0L0	17,5	14,5	29,1	315,1	2,03	5,35
C4L0	18,4	12,3	32,3	283,7	1,24	4,97
C8L0	16,2	15,7	27,2	286,5	1,16	5,22
C16L0	22,4	15,6	23,7	293,7	1,43	5,34
C32L0	21,6	19,6	21,4	274,3	0,90	4,99
C64L0	42,3	27,1	16,8	224,6	0,84	5,66
C0L2	17,7	11,1	23,6	193,0	1,27	5,66
C4L2	17,8	12,3	22,0	160,0	1,07	6,01
C8L2	19,0	14,1	25,0	296,6	1,37	6,41
C16L2	18,3	14,8	17,3	310,5	0,91	5,30
C32L2	24,3	19,6	17,9	233,4	1,00	6,09
C64L2	35,2	23,1	14,3	206,0	0,91	6,82
C0L4	17,7	9,8	23,6	275,0	1,33	6,44
C4L4	19,9	14,7	22,8	237,6	0,97	7,23
C8L4	18,8	14,1	25,3	264,3	1,27	6,63
C16L4	20,6	16,3	21,8	316,5	1,43	7,88
C32L4	25,0	15,8	22,0	274,4	1,01	6,84
C64L4	36,0	26,2	12,2	193,3	0,94	6,86
C0L8	17,3	10,1	25,8	306,8	1,33	8,30
C4L8	15,2	11,7	23,0	225,4	1,36	8,52
C8L8	18,7	11,3	24,7	259,0	0,93	9,25
C16L8	20,0	15,6	21,1	215,7	1,60	9,44
C32L8	24,8	19,6	17,4	227,7	1,11	10,98
C64L8	31,1	25,9	15,6	233,1	1,06	8,31
C0L16	15,3	9,2	26,0	212,3	1,20	14,89
C4L16	18,6	10,7	24,3	245,8	1,28	17,17
C8L16	19,0	14,7	23,7	207,2	1,40	14,90
C16L16	19,7	13,0	20,7	186,1	1,15	19,52
C32L16	22,1	17,5	19,2	176,5	0,69	18,57
C64L16	32,0	28,0	13,3	108,8	1,18	16,71
C0L32	17,2	10,1	26,8	179,6	1,33	23,31
C4L32	17,9	11,3	25,9	206,2	1,15	18,51
C8L32	18,5	11,9	26,1	181,9	1,17	23,51
C16L32	21,6	14,7	19,0	147,0	1,17	24,80
C32L32	21,9	19,0	22,1	209,0	0,67	13,18
C64L32	27,9	24,6	16,6	171,3	0,67	15,49

C = cinza de casca de arroz; **L** = lodo de estação de tratamento de esgoto

Apêndice I – Valores médios de pH, Corg, Al, H+Al, CTC pH7, V% e m% do solo em função da aplicação de doses de cinza de casca de arroz e lodo de estação de tratamento de esgoto

Tratamento	pH	Corg	Al	H+Al	CTC pH7	V%	m%
g/kg		---g/kg---	----mmolc/kg----				
C0L0	4,87	9,23	3,89	28,44	73,51	61,20	8,01
C4L0	4,83		3,08	27,71	74,48	62,84	6,18
C8L0	5,13		2,59	26,75	73,64	63,35	5,22
C16L0	5,07		2,27	28,92	77,88	65,22	4,49
C32L0	5,37		1,62	25,06	79,39	68,36	2,82
C64L0	5,67	9,91	0,65	23,85	81,43	70,94	1,06
C0L2	4,87	10,02	4,05	30,13	79,99	62,56	7,53
C4L2	4,80		3,89	28,68	80,32	64,35	7,01
C8L2	4,77		3,73	26,02	77,45	66,25	6,70
C16L2	4,87		2,11	26,02	79,16	67,05	3,86
C32L2	5,27		1,62	22,40	79,10	71,49	2,66
C64L2	5,63	9,97	0,65	23,13	84,27	72,31	1,13
C0L4	4,77	10,13	4,22	29,16	79,71	63,40	7,73
C4L4	4,67		3,41	29,89	78,62	65,50	6,69
C8L4	4,73		3,57	28,68	85,49	66,30	5,98
C16L4	5,03		2,59	27,47	83,93	67,02	4,50
C32L4	5,20		1,62	26,99	86,90	68,70	2,77
C64L4	5,70	10,36	1,46	20,47	87,31	76,21	2,10
C0L8	4,57	10,25	4,86	31,33	89,30	64,50	7,84
C4L8	4,73		3,73	32,54	88,49	63,34	6,23
C8L8	4,73		3,08	29,40	88,33	66,61	5,02
C16L8	4,67		2,59	29,89	88,01	66,02	4,27
C32L8	5,13		1,14	28,44	93,58	69,62	1,70
C64L8	5,50	10,25	0,65	23,37	90,30	73,85	1,02
C0L16	4,63	10,81	3,57	30,37	90,33	66,19	5,72
C4L16	4,57		3,57	31,33	93,94	66,41	5,44
C8L16	4,77		2,43	31,82	94,45	66,07	3,64
C16L16	4,80		1,95	30,61	94,68	67,29	3,10
C32L16	5,03		0,81	28,68	93,21	68,90	1,23
C64L16	5,47	10,70	1,14	25,54	97,12	73,72	1,53
C0L32	4,50	11,60	2,43	34,95	99,96	64,80	3,82
C4L32	4,37		2,92	33,51	97,26	65,62	4,08
C8L32	4,53		2,76	34,95	98,12	64,37	3,41
C16L32	4,67		1,30	33,26	96,52	65,49	2,02
C32L32	4,73		1,14	33,02	100,50	67,02	1,60
C64L32	5,13	12,16	0,65	27,71	103,10	72,95	0,78

C = cinza de casca de arroz; **L** = lodo de estação de tratamento de esgoto

Apêndice J – Teores médios dos macronutrientes N, P, K Ca e Mg na matéria seca da parte aérea das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). Média das três repetições.

LETE g/kg	CCA g/kg						Média
	0	4	8	16	32	64	
----- N (g/kg) -----							
0	27,72	31,01	27,32	21,95	16,81	18,31	23,85 c
2	31,30	30,38	24,77	23,04	19,87	19,12	24,74 c
4	29,63	29,68	26,33	21,31	20,39	19,58	24,49 c
8	30,09	28,30	26,91	25,76	23,04	23,04	26,19 c
16	31,70	30,84	30,61	28,99	25,76	25,12	28,84 b
32	34,36	35,52	32,80	35,57	31,36	31,42	32,39 a
Média	30,80 A	30,95 A	28,12 B	26,10 B	21,75 C	22,76 C	CV% = 13.68
----- P (g/kg) -----							
0	1,68	1,76	1,96	2,71	3,48	3,81	2,57 d
2	2,01	2,43	2,49	2,90	3,40	5,41	3,31 cd
4	2,65	2,81	2,80	3,12	3,46	5,55	3,40 c
8	3,38	3,67	3,61	3,13	4,25	5,20	3,87 bc
16	4,16	3,90	4,24	4,06	4,10	4,81	4,21 ab
32	5,17	4,78	4,86	4,41	5,10	4,49	4,80 a
Média	3,17 C	3,22 BC	3,53 BC	3,39 BC	3,96 B	4,88 A	CV% = 31.02
----- K (g/kg) -----							
0	39,01 aA	44,32 aA	40,05 abA	43,47 aA	47,83 aA	43,47 cA	43,02 a
2	33,41 abB	34,92 abB	42,04 aB	41,28 aB	43,66 aB	60,83 abA	42,69 a
4	26,86 abcC	30,65 bcBC	31,79 abcBC	40,24 aAB	42,71 aAB	50,77 bcA	37,17 bc
8	22,21 bcD	26,57 bcCD	31,41 abcCD	39,01 aBC	49,07 aB	72,13 aA	40,07 ab
16	18,412 cD	22,97 bcCD	27,43 bcCD	35,30 aBC	46,12 aB	64,16 aA	35,73 bc
32	17,18 cD	21,45 cCD	25,81 cBCD	31,22 aBC	36,16 aB	74,03 aA	34,31 c
Média	26,18 E	30,15 DE	33,09 CD	38,42 C	44,26 B	60,90 A	CV% = 20.96
----- Ca (g/kg) -----							
0	7,05	6,96	6,41	5,08	4,95	4,67	5,85 a
2	7,28	7,28	5,49	5,08	5,08	3,80	5,67 ab
4	5,31	5,54	5,72	5,22	4,53	4,08	5,07 bc
8	4,90	5,49	5,59	4,95	4,58	4,44	4,99 c
16	5,91	5,82	5,72	5,59	5,13	4,85	5,50 abc
32	6,04	5,82	5,68	6,00	5,08	5,40	5,67 ab
Média	6,08 A	6,15 A	5,77 AB	5,32 BC	4,89 CD	4,54 D	CV% = 18.32
----- Mg (g/kg) -----							
0	7,94 dA	7,49 bA	6,13 cdB	4,67 cC	4,15 aC	4,09 abC	5,75 d
2	9,30 cA	8,15 bA	5,08 dB	4,68 cBC	3,86 aBC	3,40 abC	5,74 d
4	9,98 bcA	8,22 bB	6,95 bcB	5,10 cC	3,70 aD	3,19 bD	6,19 cd
8	10,01 bcA	7,85 bB	7,51 bB	5,65 ccC	4,35 aD	3,79 abD	6,52 c
16	11,21 abA	9,95 aA	8,19 abB	6,57 bC	4,67 aD	3,50 abD	7,35 b
32	11,33 aA	10,91 aA	8,94 aB	8,29 aB	4,84 aC	4,54 aC	8,14 a
Média	9,96 A	8,76 B	7,13 C	5,83 D	4,26 E	3,75 E	CV% = 12.02

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade. O Coeficiente de variação (CV) é referente a todos os tratamentos da variável estudada.

Apêndice K – Teores médios dos micronutrientes Mn, Fe, Cu, Zn na matéria seca da parte aérea das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). Média das três repetições.

LETE g/kg	CCA g/kg						Média
	0	4	8	16	32	64	
----- Mn (mg/kg) -----							
0	132,21	106,68	73,60	48,20	39,86	32,83	72,58 a
2	148,10	109,81	53,02	48,33	38,95	34,91	72,19 a
4	136,25	90,01	79,72	52,10	39,86	31,65	71,60 a
8	147,06	78,55	74,12	62,00	43,51	37,25	73,75 a
16	121,40	93,92	83,24	66,69	44,68	36,99	74,49 a
32	109,29	93,92	81,02	77,11	54,84	36,86	75,51 a
Média	132,39 A	95,48 B	74,12 C	59,07 D	43,62 E	35,43 E	CV% = 27.31
----- Fe (mg/kg) -----							
0	232,42	154,81	131,04	90,41	57,09	58,21	120,66 a
2	163,04	182,24	106,86	79,84	62,37	59,12	99,86 b
4	247,25	134,50	50,52	74,56	60,54	54,65	102,16 b
8	209,67	99,75	105,65	78,42	68,06	62,78	104,05 b
16	155,22	98,13	90,81	80,05	61,36	61,56	91,19 b
32	103,00	83,91	71,31	84,31	68,47	73,14	80,69 b
Média	176,04 A	135,71 B	91,19 C	81,27 C	62,98 C	70,09 C	CV% = 46.14
----- Cu (mg/kg) -----							
0	6,50	5,96	3,68	2,83	2,26	2,54	3,96 ab
2	5,37	4,52	2,83	3,68	2,54	2,54	3,58 abc
4	5,94	4,81	2,83	2,83	1,98	1,98	3,39 bc
8	4,52	3,96	3,68	3,11	3,39	2,26	3,49 abc
16	4,81	3,96	3,11	3,11	2,26	2,54	3,30 c
32	5,37	5,09	3,68	3,96	3,68	3,11	4,15 a
Média	5,42 A	4,72 B	3,30 C	3,25 C	2,69 CD	2,50 D	CV% = 27.27
----- Zn (mg/kg) -----							
0	161,49 cdA	171,94 abA	158,33 aA	97,80 bB	65,433 bB	78,66 bB	122,28 c
2	265,21 aA	176,81 abB	99,19 bC	90,49 bC	75,53 bC	60,21 bC	127,91 bc
4	207,44 bcdA	148,96 abB	147,22 abB	106,15 bBC	76,57 bC	56,38 bC	123,79 c
8	227,62 abA	141,66 bBC	150,36 abB	111,72 bBCD	90,14 bCD	66,83 bD	131,39 bc
16	213,36 abcA	188,29 abAB	163,58 aAB	140,26 bBC	102,67 abC	87,71 abC	149,31 ab
32	153,14 dAB	200,82 aA	186,90 aAB	200,48 aA	155,23 aAB	136,78 aB	172,23 a
Média	204,71 A	171,41 B	150,93 B	124,49 C	94,26 D	81,09 D	CV% = 25.21

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade. O Coeficiente de variação (CV) é referente a todos os tratamentos da variável estudada.

Apêndice L – Quantidades dos macronutrientes N, P, K Ca e Mg acumulados pela parte aérea das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). Média de três repetições.

LETE g/kg	CCA g/kg						Média
	0	4	8	16	32	64	
----- N (mg/vaso) -----							
0	114,2	154,9	187,9	211,6	183,0	210,8	177,1 f
2	196,2	236,4	224,9	238,6	258,2	230,1	230,7 e
4	254,8	295,8	285,5	246,3	273,9	252,1	268,1 c
8	308,2	334,7	352,2	346,4	321,7	310,1	328,9 c
16	436,2	446,1	444,6	446,0	390,9	361,9	420,9 b
32	561,8	599,6	580,9	605,2	540,0	561,2	574,8 a
Média	311,9 B	344,6 A	346,0 A	349,0 A	327,9 AB	321,0 AB	CV% = 13.02
----- P (mg/vaso) -----							
0	6,7	8,7	13,7	25,9	37,9	45,1	22,9 e
2	12,2	19,1	23	29,5	43,2	63,5	31,7 de
4	22,4	27,9	30,7	35,7	45,9	70,5	38,8 d
8	34,2	43,4	47,2	41,6	58,3	69,8	49,1 c
16	56,8	56,5	61,5	61,7	61,8	68,4	61,1 b
32	84,8	80,3	86,5	83,3	86,3	80,5	82,2 a
Média	36,2 C	39,3 C	43,7 C	44,9 C	55,6 B	66,3 A	CV% = 30.31
----- K (mg/vaso) -----							
0	161,5 aC	221,7 aC	276,6 aBC	419,3 aAB	521,9 aA	511,6 eA	352,1 c
2	209,2 aD	272,6 aCD	378,9 aBCD	428,1 aBC	567,7 aAB	729,8 cdA	431,1 b
4	229,8 aC	305,4 aBC	346,8 aBC	459,2 aAB	573,3 aA	650,5 deA	427,5 bc
8	227,1 aD	312,4 aD	411,4 aCD	523,8 aBC	681,5 aB	983,0 bA	523,2 a
16	253,1 aD	331,8 aD	398,8 aCD	538,2 aBC	699,3 aB	922,0 bcA	523,9 a
32	280,7 aD	361,3 aCD	443,4 aBCD	531,3 aBC	591,5 aB	1321,8 aA	588,4 a
Média	226,9 E	300,9 DE	375,9 D	483,3 C	605,9 B	853,1 A	CV% = 25.00
----- Ca (mg/vaso) -----							
0	29,7	35	44,9	48,9	53,9	53,7	44,4 e
2	46,8	47	51,4	52,6	57,2	45,3	53,4 d
4	44,7	55,2	63	60,2	60,5	52,3	55,9 cd
8	49,7	65,5	74,1	66,4	63,7	59,8	63,2 c
16	81,9	84,5	83,2	85,6	77,8	70,1	80,5 b
32	99,4	98,6	100,9	102	95,1	97,5	97,3 a
Média	58,7 B	66,2 AB	69,6 A	69,3 A	67,9 A	63,1 AB	CV% = 20.08
----- Mg (mg/vaso) -----							
0	32,2 eA	37,2 eA	42,2 eA	44,9 dA	45,4 cA	46,2 bA	41,4 f
2	57,6 dAB	64,1 dA	47,0 eAB	48,3 dAB	49,5 cAB	40,7 bB	51,2 e
4	85,2 cA	81,9 cA	75,7 dAB	58,3 dBC	49,6 cC	40,9 bC	65,3 d
8	102,0 cA	93,3 cAB	98,7 cA	76,2 cBC	60,9 bcCD	50,9 bD	80,3 c
16	154,8 bA	144,3 bA	118,9 bB	100,9 bC	70,9 abD	50,4 bE	106,7 b
32	185,9 aA	184,9 aA	158,9 aB	141,0 aC	80,0 aD	81,5 aD	138,8 a
Média	102,9 A	100,9 A	90,2 B	78,3 C	59,4 D	51,8 E	CV% = 13.39

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade. O Coeficiente de variação (CV) é referente a todos os tratamentos da variável estudada.

Apêndice M – Quantidades dos micronutrientes (Mn, Fe, Cu, Zn) acumulados pela parte aérea das plantas em função das doses de cinza de casca de arroz (CCA) e lodo de estação de tratamento de esgoto (LETE). Média de três repetições.

LETE g/kg	CCA g/kg						Média
	0	4	8	16	32	64	
----- Mn (mg/vaso) -----							
0	0,530 eA	0,529 cA	0,510 dA	0,460 dA	0,435 cA	0,403 bA	0,478 f
2	0,899 dA	0,860 bA	0,488 dB	0,490 dB	0,495 bcB	0,416 abB	0,608 e
4	1,155 cA	0,895 bB	0,869 cB	0,592 cdC	0,528 bcC	0,405 bC	0,741 d
8	1,486 bA	0,935 bB	0,970 bcB	0,829 bcBC	0,606 bcCD	0,499 abD	0,888 c
16	1,658 abA	1,361 aB	1,207 abBC	1,022 bC	0,678 bD	0,529 abD	1,076 b
32	1,794 aA	1,590 aAB	1,433 aBC	1,313 aC	0,937 aD	0,650 aE	1,287 a
Média	1,254 A	1,028 B	0,913 C	0,784 D	0,613 E	0,484 F	CV% = 17.30
----- Fe (mg/vaso) -----							
0	0,917 bA	0,795 bA	0,913 abA	0,858 bA	0,623 bA	0,673 bA	0,797 d
2	0,727 bB	1,466 aA	0,958 abAB	0,817 bB	0,806 abB	0,707 bB	0,913 cd
4	2,099 aB	1,336 aB	0,461 bC	0,849 bBC	0,810 abC	0,703 bC	1,043 bc
8	2,105 aA	1,182 abBC	1,373 aB	1,051 abBC	0,948 abBC	0,845 abC	1,251 ab
16	2,101 aA	1,420 aB	1,317 aBC	1,239 abBC	0,929 abBC	0,893 abC	1,317 a
32	1,675 aA	1,430 aA	1,274 aA	1,437 aA	1,179 aA	1,304 aA	1,383 a
Média	1,604 A	1,272 B	1,050 C	1,042 C	0,883 C	0,854 C	CV% = 8.64
----- Cu (mg/vaso) -----							
0	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,021	0,025 d
2	0,033	0,035	0,031	0,031	0,032	0,031	0,032 c
4	0,052	0,048	0,035	0,033	0,026	0,025	0,036 c
8	0,046	0,047	0,048	0,046	0,045	0,030	0,044 b
16	0,066	0,057	0,045	0,047	0,034	0,036	0,048 b
32	0,088	0,086	0,066	0,068	0,062	0,056	0,071 a
Média	0,052 A	0,050 A	0,042 B	0,042 B	0,037 BC	0,033 C	CV% = 24.85
----- Zn (mg/vaso) -----							
0	0,652	0,854	1,095	0,945	0,715	0,869	0,855 e
2	1,676	1,387	0,903	0,936	0,985	0,731	1,103 de
4	1,776	1,483	1,590	1,204	1,031	0,725	1,302 cd
8	2,322	1,671	1,966	1,503	1,253	0,906	1,604 c
16	2,942	2,725	2,377	2,159	1,557	1,272	2,172 b
32	2,622	3,392	3,322	3,409	2,693	2,466	2,983 a
Média	1,998 A	1,919 A	1,875 A	1,693 AB	1,372 BC	1,161 C	CV% = 29.68

As médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna e da mesma letra maiúscula na linha não diferem estatisticamente entre si pelo Teste t ao nível de 5% de probabilidade. O Coeficiente de variação (CV) é referente a todos os tratamentos da variável estudada.