

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**SAMUEL FERREIRA DA SILVA**

**USO DA VINHAÇA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NO SOLO, NOS TEORES  
NUTRICIONAIS DO TECIDO FOLIAR E NA PRODUÇÃO DURANTE TRÊS SAFRAS**

**ALEGRE - ES**

**2017**

**SAMUEL FERREIRA DA SILVA**

**USO DA VINHAÇA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NO SOLO, NOS TEORES NUTRICIONAIS DO TECIDO FOLIAR E NA PRODUÇÃO DURANTE TRÊS SAFRAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na área de concentração, Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia.  
Coorientadores: Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis e Prof. Dr. Leandro Pin Dalvi.

**ALEGRE - ES**

**2017**

S586u Silva, Samuel Ferreira da, 1990-  
Uso da vinhaça na cultura do milho: efeitos no solo, nos teores nutricionais do tecido foliar e na produção durante três safras / Samuel Ferreira da Silva. – 2017.

92 f. : il.

Orientador: Giovanni de Oliveira Garcia.

Coorientador: Edvaldo Fialho dos Reis ; Leandro Pin Dalvi.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Zea mays L. 2. Resíduos industriais como fertilizantes.  
3. Resíduos orgânicos. 4. Solos – Fertilidade. 5. Nutrição foliar.  
6. Produtividade agrícola. I. Garcia, Giovanni de Oliveira. II. Reis, Edvaldo Fialho dos. III. Leandro Pin Dalvi. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. V. Título.

CDU: 63

---

## SAMUEL FERREIRA DA SILVA

### USO DA VINHAÇA NA CULTURA DO MILHO: EFEITOS NO SOLO, NOS TEORES NUTRICIONAIS DO TECIDO FOLIAR E NA PRODUÇÃO DURANTE TRÊS SAFRAS

Tese apresentada à Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor em Produção Vegetal, na linha de pesquisa, Recursos Hídricos e Geoprocessamento em Sistemas Agrícolas.

Aprovada em 22 de fevereiro de 2017.

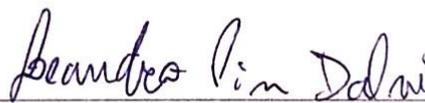
#### COMISSÃO EXAMINADORA



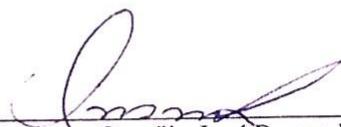
Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia  
Universidade Federal do Espírito Santo  
- Campus de Alegre  
Orientador



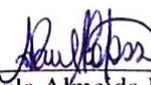
Prof. Dr. Edvaldo Fialho dos Reis  
Universidade Federal do Espírito Santo  
- Campus de Alegre  
(Examinador interno)



Prof. Dr. Leandro Pin Dalvi  
Universidade Federal do Espírito Santo  
- Campus de Alegre  
(Examinador interno)



Prof. Dr. Otacílio José Passos Rangel  
Instituto Federal do Espírito Santo  
- Campus de Alegre  
(Examinador externo)



Dra. Ana Paula Almeida Bertossi Souza  
Universidade Federal do Espírito Santo  
- Campus de Alegre  
(Examinadora externa)

## AGRADECIMENTOS

Ao único digno de toda honra e glória, nosso Deus, pela força e proteção durante a minha vida. Sempre me proporcionando a oportunidade de seguir em frente.

Ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo - CCAE-UFES, juntamente ao programa de Pós-graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade de realização do curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo - FAPES, pela concessão da bolsa de Doutorado e taxa de bancada, que foram fundamentais para a concretização do curso.

Ao Professor, Orientador e Amigo, Dr. Giovanni de Oliveira Garcia, pela dedicação, paciência, ensinamentos, orientações e incentivos, que me permitiram alcançar os objetivos propostos.

Aos Professores Dr. Edvaldo Fialho dos Reis e Dr. Leandro Pin Dalvi, pela coorientação, pelo apoio, ensinamentos e incentivo durante a realização deste trabalho.

Aos demais professores, técnicos e funcionários da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Ao professor Dr. Otacílio José Passos Rangel e a Pós-doutoranda Ana Paula Almeida Bertossi Souza, por aceitarem o convite para comporem a banca de defesa desta Tese, colaborando e enriquecendo este trabalho, ao compartilharem seus conhecimentos científicos.

Aos proprietários do Alambique de aguardente Jerusalém, Victor, Jairo e Júnior, pela disponibilidade da vinhaça, efluente alvo do presente estudo. E ao Paulo, que forneceu a área para a instalação dos experimentos, na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES.

À minha família, em especial, a Luiza Rosa (vó), Geucely Rosa (mãe), Cleziel Ferreira (pai), Kennedy Samy Ferreira (irmão), Kassiane Rosa (irmã) e Carolina Bernardes (namorada), que sempre estão comigo, me apoiando, amando e me incentivando a continuar. Sendo a minha base durante toda a vida.

Agradeço aos meus amigos, em especial, ao Lucas Rosa, Patricia Alvarez, Rodolfo Mendonça, Victor Maurício, Léo Dias, Danilo Mendes, Anatan da Matta, Camilo Busato, Caio Martins, Ridd Karlos, Francisco Mota, entre muitos outros, que fizeram parte desta caminhada. A amizade e o apoio de vocês foram e são fundamentais na minha vida.

Muito obrigado!

*Ofereço esta obra a minha querida mãe...*

Geucely Rosa da Silva

*Quem somente observa o vento nunca semeará, e o  
que olha para as nuvens nunca segará.*

Eclesiastes 11:4

*Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam  
orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam  
humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem  
desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que  
as cheias as baixam para a terra, sua mãe.*

Leonardo da Vinci

## RESUMO

SILVA, Samuel Ferreira da. **Uso da vinhaça na cultura do milho: efeitos no solo, nos teores nutricionais do tecido foliar e na produção durante três safras.** 2017. Tese (Doutorado em Produção Vegetal). Universidade Federal do Espírito Santo. Orientador: D.Sc. Giovanni de Oliveira Garcia. Coorientadores: D.Sc. Edvaldo Fialho dos Reis e D.Sc. Leandro Pin Dalvi.

O uso de efluentes de origem agroindustriais em cultivos agrícolas pode contribuir com a redução da aplicação de fertilizantes, bem como colaborar com a fertilidade do solo. Diante do exposto, objetivou-se com a realização deste trabalho, estudar as alterações nos atributos químicos do solo, os teores nutricionais do tecido foliar e a produção da cultura do milho (híbrido AG 1051), decorrentes da aplicação de diferentes doses de vinhaça, durante três safras. O estudo foi desenvolvido em condições de campo na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES, nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015. Em cada ano agrícola foram realizados simultaneamente dois cultivos independentes, um para a produção de forragem e o outro para a produção de grãos. Cada cultivo foi instalado seguindo um esquema de parcelas subdivididas em um delineamento em blocos casualizados com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos pela adubação mineral (NPK) e cinco doses de vinhaça, correspondentes a 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Cada parcela experimental foi composta por 44 plantas cultivadas no espaçamento de 0,20 m entre covas e 0,90 m entre linhas, com 10 plantas úteis (avaliadas) e 34 plantas de bordaduras (não avaliadas). A adubação mineral e as doses de vinhaça foram aplicadas uma única vez, de acordo com os tratamentos, quando a cultura apresentou de 3 a 5 folhas. Para avaliar as possíveis alterações nos atributos químicos do solo, após cada cultivo, foram coletadas amostras em três profundidades (0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm), para a determinação dos valores de pH e os teores de fósforo, potássio, sódio, cálcio, magnésio, alumínio e matéria orgânica. Para a avaliação do estado nutricional da cultura do milho, as folhas foram amostradas quando 50% das plantas de milho apresentaram pendoamento, aproximadamente na 10<sup>a</sup> semana após a germinação, coletando-se o terço médio da folha oposta e abaixo da espiga, na área útil de cada parcela experimental. Nas amostras foliares foram analisados os teores de macronutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio; e, micronutrientes: boro, cobre, ferro e zinco. A avaliação dos atributos químicos do solo, bem como dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho, foram realizadas apenas no cultivo correspondente a produção de grãos, nos três anos agrícolas. Com base nos resultados obtidos, observou-se que o uso agrícola da vinhaça nas doses superiores a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>,

durante três safras, apresentou potencial para melhorar a fertilidade do solo, contribuindo com o aumento nos teores de P, K, Ca, Mg e MO, além de reduzir o teor de Al. Estas alterações foram mais expressivas nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Além disso, as doses de vinhaça superiores a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, promoveram teores foliares de N, P, K, S, Ca, Mg e B, semelhantes àqueles obtidos com o fornecimento da adubação mineral, nas três safras. Quanto à produção de forragem, os maiores rendimentos foram obtidos nas doses correspondentes a 123,61, 133,42 e 130,77 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, com uma produção superior a 50 t ha<sup>-1</sup>, nas três safras. Para a produção de grãos, os melhores rendimentos foram obtidos nas doses correspondentes a 152,67, 152,16 e 134,60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, com uma produção superior a 12 t ha<sup>-1</sup>, nas três safras. Deste modo, se utilizada com critérios técnicos e em doses adequadas à vinhaça torna-se um subproduto de interesse agrônomo, apresentando possibilidades reais de uso em cultivos agrícolas.

**Palavras-chave:** *Zea mays* L. Aplicação de efluente. Resíduo orgânico. Fertilidade do solo. Nutrição foliar. Produtividade agrícola.

## ABSTRACT

SILVA, Samuel Ferreira da. **Use of vinasse on maize cultivation: effects on soil, nutritional levels of the leaf tissue and on production during three crops.** 2017. Thesis (Doctorate in Vegetable Production). Federal University of Espírito Santo. Advisor: D.Sc. Giovanni de Oliveira Garcia. Co-advisors: D.Sc. Edvaldo Fialho dos Reis and D.Sc. Leandro Pin Dalvi.

The use of effluents of agro-industrial origin in agricultural cultivations may contribute with the reduction of fertilizers application, as well as collaborate with soil fertility. This way, with the accomplishment of this work, it was aimed to study the alterations in the soil chemical attributes, the nutritional levels of the leaf tissue and the production of maize cultivation (hybrid AG 1051) resulting from the application of different doses of vinasse, during three crops. The study was carried out under field conditions in the rural community Jerusalém, in the municipality of Alegre, ES, in the agricultural years of 2013, 2014 and 2015. In each agricultural year, two independent cultivations were carried out simultaneously, one for forage production and the other for grain production. Each cultivation was installed following a subdivided parcel model in a randomized blocks design with six treatments and four replications. The treatments were composed by mineral fertilization (NPK) and five vinasse doses, corresponding to 50, 100, 150, 200 and 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Each experimental parcel was composed by 44 plants cultivated with 0.20 m spacing among hole and 0.90 m spacing among rows, with 10 useful plants (evaluated plants) and 34 border plants (non-evaluated). Mineral fertilization and vinasse doses were applied once, according to the treatments, when the crop presented from 3 to 5 leaves. To evaluate the possible alterations in the soil chemical attributes, after each cultivation, samples were collected from three depths (0 to 10, 10 to 20 and 20 to 40 cm), for the determination of pH values and levels of phosphorus, potassium, sodium, calcium, magnesium, aluminum and organic matter. For the evaluation of the nutritional condition of the maize cultivation, leaves were sampled when 50% of maize plants presented bolting, approximately on the 10<sup>th</sup> week after germination, collecting the medium third part of the opposite leaf and beneath the spike, at the useful area of each experimental parcel. Levels of macronutrients were evaluated on the leaf samples: nitrogen, phosphorus, potassium, sulphur, calcium and magnesium; and, micronutrients: boron, copper, iron and zinc. The evaluation of the soil chemical attributes, as well as the nutritional levels in the leaf tissue of the maize cultivation were only carried out on the crop which corresponded to grain production, in the three agricultural years. Based on the obtained results, it was observed that the agricultural use of vinasse on doses higher than 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, during three crops, presented

potential to improve soil fertility, contributing with the increase on the levels of P, K, Ca, Mg and MO, besides reducing Al level. These alterations were more expressive on the depths of 0 to 10 and 10 to 20 cm. Besides, vinasse doses higher than 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, promoted leaf levels of N, P, K, S, Ca, Mg and B, similar to the ones obtained with the supply of the mineral fertilization, on the three crops. Concerning forage production, the higher yields were obtained with the doses corresponding to 123.61, 133.42 and 130.77 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, in the agricultural years of 2013, 2014 and 2015, respectively, with a production higher than 50 t ha<sup>-1</sup>, on the three crops. For grain production, the best yields were obtained on the doses corresponding to 152.67, 152.16 and 134.60 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, for the agricultural years of 2013, 2014 and 2015, respectively, with a production higher than 12 t ha<sup>-1</sup>, on the three crops. This way, if used with technical criteria and in adequate doses, vinasse may become a sub product of agronomic importance presenting real possibilities of use in agricultural cultivations.

**Key-words:** *Zea mays* L. Effluent application. Organic residue. Soil fertility. Leaf nutrition. Agricultural productivity.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área plantada e produtividade do milho por região no Brasil, na safra de 2014/2015.....	24
Tabela 2. Atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, em amostras coletadas antes da instalação do experimento.....	27
Tabela 3. Adubação mineral NPK (kg ha <sup>-1</sup> ) fornecida à cultura nos três anos agrícolas.....	29
Tabela 4. Caracterização química da vinhaça utilizada nos três anos agrícolas.....	30
Tabela 5. Aporte de nutrientes e matéria orgânica (kg ha <sup>-1</sup> ) decorrente da aplicação das diferentes doses de vinhaça nos três anos agrícolas.....	31
Tabela 6. Caracterização físico-hídrica do solo na área de estudo.....	35
Tabela 7. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2013.....	37
Tabela 8. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2014.....	39
Tabela 9. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2015.....	40
Tabela 10. Valores médios dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas.....	50
Tabela 11. Valores médios da produção de massa fresca (MF) e massa seca (MS) da parte aérea e produção de forragem (PF) por hectare da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas.....	59
Tabela 12. Valores médios do peso da espiga completa, peso dos grãos e produção total de grãos por hectare da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área experimental na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES.....	26
Figura 2. Precipitação acumulada mensal (PREC) e temperatura máxima (MÁX), mínima (MÍN) e média (MÉD) mensal, na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES, durante os anos de 2013, 2014 e 2015.....	27
Figura 3. Representação esquemática de uma parcela experimental.....	29
Figura 4. Evapotranspiração da cultura (ETc) (A1, 2 e 3) e lâmina de irrigação aplicada (Li) (B1, 2 e 3) durante o período de cultivo nos três anos agrícolas.....	36
Figura 5. Teores de matéria orgânica (A1, 2 e 3) e pH (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	42
Figura 6. Teores de fósforo (A1, 2 e 3) e potássio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	44
Figura 7. Teores de cálcio (A1, 2 e 3) e magnésio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	46
Figura 8. Teores de sódio (A1, 2 e 3) e alumínio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	48
Figura 9. Teores de nitrogênio e potássio (A1, 2 e 3) e fósforo e enxofre (B1, 2 e 3) no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas. ....	53
Figura 10. Teores de cálcio e magnésio no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	55
Figura 11. Teores de boro e cobre (A1, 2 e 3) e ferro e zinco (B1, 2 e 3) no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	57
Figura 12. Massa fresca (MF) e massa seca (MS) da parte aérea da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	61
Figura 13. Produção de forragem por hectare da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	62
Figura 14. Peso da espiga completa (PE) e peso dos grãos (PG) da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	67
Figura 15. Produção de grãos (PG) da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.....	69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO, HIPÓTESES E OBJETIVOS</b> .....	14
1.1 INTRODUÇÃO.....	14
1.2 HIPÓTESES.....	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	19
2.1 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE O USO AGRÍCOLA DE EFLUENTES.....	19
2.1.1 Legislação nacional.....	19
2.1.2 Legislação estadual.....	20
2.2 USO AGRÍCOLA DE EFLUENTES.....	21
2.3 CULTURA DO MILHO ( <i>Zea mays</i> L.): ASPECTOS GERAIS.....	23
2.3.1 Cenário nacional.....	24
2.3.2 Importância econômica e social para o estado do Espírito Santo.....	25
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	26
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	26
3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	28
3.3 APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (ADUBAÇÃO MINERAL E VINHAÇA).....	29
3.4 AVALIAÇÕES.....	32
3.4.1 Avaliação dos atributos químicos do solo.....	32
3.4.2 Avaliação dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho.....	32
3.4.3 Avaliação da produção da cultura do milho.....	33
3.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO.....	33
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	36
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	37
4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO.....	37
4.2 TEORES NUTRICIONAIS NO TECIDO FOLIAR DA CULTURA DO MILHO.....	49

4.3 PRODUÇÃO DA CULTURA DO MILHO.....	58
4.3.1 Forragem.....	58
4.3.2 Grãos.....	64
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>71</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>72</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>73</b>
<b>8 ANEXOS.....</b>	<b>88</b>

# 1 INTRODUÇÃO, HIPÓTESES E OBJETIVOS

## 1.1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, juntamente com o desenvolvimento de atividades agrícolas e industriais nos últimos anos, proporcionou um aumento na demanda por água. Desta forma, no Brasil, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Além da escassez de recursos hídricos em determinadas regiões do país, outro problema é a deterioração da qualidade das águas, causada pelo uso inadequado de efluentes gerados nas etapas de produção desses setores agrícolas e industriais (GUNKEL *et al.*, 2007; BERTONCINI, 2008; DANTAS *et al.*, 2015).

A destinação final desses efluentes é um tema cada vez mais abordado e presente na pauta de discussões em diferentes segmentos da sociedade, recebendo cada vez mais atenção por parte do governo. Duas questões principais são colocadas como centrais, quando se discute sobre a importância do destino adequado desses efluentes, uma diz respeito à proteção da saúde da população, e a outra, relacionada com o meio ambiente (GONZÁLEZ *et al.*, 2012; CRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

Diante deste cenário, uma das possibilidades que se tem apresentado é o aproveitamento desses efluentes em atividades produtivas, especificamente em cultivos agrícolas, com significativos benefícios sociais, econômicos e ambientais (BEVILACQUA e KOPSCHITZ, 2009; LIMA *et al.*, 2012; NAIR e TAHERZADEH, 2016).

Neste contexto, a Agenda 21 realizada em 1994, dedicou atenção especial à utilização de efluentes, recomendando a implementação de políticas públicas de gestão dirigidas para o uso e reciclagem de efluentes, integrando proteção da saúde pública com práticas ambientais adequadas na gestão de resíduos líquidos e sólidos, principalmente de indústrias com beneficiamento de produtos que geram resíduos em grandes volumes e isentos de metais pesados ou microrganismos patogênicos (ONU, 1994).

Entre as indústrias que geram consideráveis volumes de efluentes no Brasil, destaca-se o setor sucroalcooleiro, o qual segundo dados da CONAB (2016) na safra de 2015/2016, em 10,87 milhões de hectares de área plantada produziu 665,58 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e de 30,46 bilhões de litros de etanol.

Não distante, mas com características peculiares e de importante geração de renda, outra atividade do ramo sucroalcooleiro em crescente expansão é a produção de aguardente, popularmente conhecida como “cachaça”. Esta bebida foi valorizada depois da certificação de

qualidade e de ações governamentais de incentivo à produção e exportação (SORATTO *et al.*, 2007). A produção oficial de aguardente no Brasil está em torno de 1,80 bilhões de litros por ano, tendo como principais estados produtores São Paulo e Minas Gerais. A exportação média é de aproximadamente 20 milhões de litros por ano (CBRC, 2016).

As produções de açúcar, etanol e aguardente geram um resíduo líquido denominado de vinhaça, a qual se estima que são produzidos cerca de 10 a 14 litros para cada litro de etanol ou aguardente produzidos (MAPA, 2007a; SILVA *et al.*, 2014a). Considerando a atual produção anual de etanol e aguardente de 30,46 e 1,80 bilhões de litros, respectivamente, e levando em consideração o nível tecnológico das destilarias do país, tem-se uma produção média de 387,12 bilhões de litros de vinhaça a cada ano.

A vinhaça, também conhecida como vinhoto, possui odor forte, coloração marrom-escuro, baixo pH, consideráveis valores de potássio e matéria orgânica. No entanto, devido a sua composição bioquímica, este efluente possui poder poluidor cerca de cem vezes maior que o esgoto doméstico (MAPA, 2007a; SILVA *et al.*, 2014a), e se lançado no solo ou na água pode provocar danos ambientais e até mesmo comprometer a manutenção da biota existente (LÓPEZ *et al.*, 2010; DERERIE *et al.*, 2011).

A vinhaça apresenta composição química variável. Este aspecto pode estar relacionado à cana-de-açúcar utilizada nos sistemas de produção, no método e sistema da fermentação alcoólica, na levedura e também dos aparelhos utilizados na destilação (HUTNAN *et al.*, 2003; NOGUEIRA *et al.*, 2015). Entretanto, de maneira geral a vinhaça é constituída em média por 93% de água e 7% de sólidos, dos quais 75% correspondem à matéria orgânica e o restante aos teores de macro e micronutrientes (MARQUES, 2006; DOELSCH *et al.*, 2009).

Pesquisas desenvolvidas visando o uso agrícola da vinhaça, apontam esta atividade como uma alternativa para despor de forma adequada este resíduo, pois quando realizado com critérios técnicos, a vinhaça apresenta potencial para melhorar os índices de produtividade de culturas de interesse e reduzir a necessidade de utilização da adubação mineral (JIANG *et al.*, 2012; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Entretanto, quando aplicada sem critérios técnicos podem acarretar efeitos indesejáveis, como o comprometimento da qualidade da cultura produzida, além de alterações nos atributos químicos, físicos e microbiológicos do solo (CAMILOTTI *et al.*, 2009; LÓPEZ *et al.*, 2010; LAMAISON *et al.*, 2015).

Neste aspecto, Paulino *et al.* (2011) aplicando a vinhaça ao longo do tempo em uma área agrícola na região Noroeste do estado do Paraná, constataram que nas áreas que receberam aplicação anual de vinhaça durante quatro anos, os valores de macronutrientes foram mais acentuados do que no solo sem aplicação de vinhaça, principalmente para os teores de potássio,

cálcio e magnésio, possivelmente pela maior retenção destes cátions em virtude do maior contato entre os colóides do solo e a vinhaça. Além disso, devido a uma maior quantidade de íons trocáveis na camada superficial do solo, houve também maior desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar ao longo dos anos de estudo.

De maneira semelhante, Basso *et al.* (2013) aplicando a vinhaça como fonte de potássio para o cultivo do milho na região Noroeste do Rio Grande do Sul, observaram um aumento na produtividade de grãos do milho safrinha em 26% quando comparado ao cultivo convencional com a adubação mineral. Em outro estudo, foi constatado por Bonini *et al.* (2014), que a aplicação da vinhaça como fonte de nutrientes em cultivos agrícolas proporcionou aumento significativo nos teores de potássio, cálcio e sódio do solo. Apesar do aumento destes cátions, a aplicação da vinhaça não provocou limitações de natureza química ou física no solo.

Desta forma, o uso agrícola da vinhaça pode ser de fato uma alternativa para incorporar nutrientes ao solo e incrementar a produtividade de culturas. Entretanto, o uso de efluentes na agricultura deve ser estudado, a fim de definir as doses adequadas a serem aplicadas nos cultivos a curto, médio e longo prazo, monitorando as alterações no solo e os índices de produtividade em cultivos sucessivos da cultura na mesma área.

## 1.2 HIPÓTESES

Considerando que o uso de efluentes líquidos em cultivos agrícolas tem sido foco de diversas pesquisas nos últimos anos, tem se:

1. A utilização da vinhaça no cultivo do milho como fonte de nutrientes proporciona melhorias na fertilidade do solo;

2. A vinhaça fornece nutrientes em condições satisfatórias para manter, dentro da faixa ideal, os teores foliares de macro e micronutrientes na cultura do milho;

3. A produção da cultura do milho é influenciada pela aplicação de diferentes doses de vinhaça durante três safras; e,

4. A aplicação anual da vinhaça em diferentes doses proporciona uma maior produtividade da cultura do milho.

### 1.3 OBJETIVOS

Com o intuito de estudar o uso da vinhaça na cultura do milho e seu impacto nos atributos químicos do solo e no estado nutricional da cultura, associada à necessidade de se estabelecer doses adequadas de vinhaça a serem aplicadas nos cultivos agrícolas, foi estabelecido o seguinte objetivo geral:

a) Geral:

Avaliar o uso da vinhaça no cultivo do milho, avaliando os atributos químicos do solo, o estado nutricional da cultura e a sua produção, decorrentes da aplicação de diferentes doses de vinhaça, durante três safras.

Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

b) Específicos:

b.1) Avaliar o uso da vinhaça no cultivo do milho como fonte de nutrientes e seu impacto na fertilidade do solo;

b.2) Avaliar o uso agrícola da vinhaça e sua implicação no fornecimento de nutrientes para manter em concentrações ideais os teores foliares de macro e micronutrientes na cultura do milho;

b.3) Avaliar a produção de grãos da cultura do milho decorrentes da aplicação da adubação mineral e vinhaça durante três safras; e,

b.4) Determinar a dose de vinhaça que proporcionará a maior produtividade de forragem e grãos de milho durante três safras.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL SOBRE O USO AGRÍCOLA DE EFLUENTES

#### 2.1.1 Legislação nacional

As legislações sobre o uso agrícola de efluentes têm por objetivo principal regulamentar a atividade e possibilitar que sua aplicação seja realizada com critérios técnicos, a fim de evitar possíveis danos a população e ao ambiente. Portanto, para que a aplicação desses efluentes, independente de sua origem, seja realizada de maneira adequada e criteriosa é necessário atentar para algumas normativas e legislações que tratam sobre o uso agrícola de efluentes.

Neste sentido, a política nacional dos recursos hídricos do Brasil, tem um enfoque para a questão do gerenciamento destes recursos, sendo a Lei nacional das águas número 9.433 de 8 de janeiro de 1997 que a institui. Sua ênfase legislativa incide na racionalização do uso da água, estabelecendo princípios e instrumentos para sua utilização sustentável. Aborda também sobre a importância da gestão sobre a qualidade e quantidade hídrica, seu enquadramento, outorga e a cobrança do uso da água, além da utilização e reutilização deste recurso (BRASIL, 1997).

Quanto aos efluentes, a resolução mais específica é apresentada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), sendo esta, a Resolução CONAMA número 357 de 17 de março de 2005, onde é definido que todo efluente para ser lançado em um corpo receptor deverá passar por um tratamento e respeitar as normas de lançamentos, tendo conhecimento sobre o enquadramento e suporte do corpo receptor. De maneira geral, tal instrumento visa estabelecer metas de qualidade para os corpos hídricos, sendo assim, o uso de efluente tratado para determinados fins traria benefícios aos corpos d'água devido à diminuição da carga poluidora (CONAMA, 2005).

Apesar de ser estabelecida, nesta resolução, normas para o tratamento dos efluentes, não foi abordado de forma clara os aspectos ligados ao uso destes efluentes, com isso foi apresentada uma nova resolução CONAMA número 430 de 13 de maio de 2011, que complementa e altera a Resolução 357/2005, incentivando a utilização criteriosa dos efluentes como forma de reduzir a quantidade que seria destinada aos corpos hídricos, bem como colaborar para a diminuição da captação de águas superficiais (CONAMA, 2011).

Para o caso específico da vinhaça, existe a Portaria do Ministério do Interior número 323 de 29 de novembro de 1978, onde foi estabelecido que a partir da safra 1979/1980 ficaria proibido o lançamento direto ou indireto da vinhaça sem tratamento em qualquer corpo hídrico,

pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham a ser instaladas no país. Além disso, a Portaria do Ministério do Interior número 158 de 3 de novembro de 1980, também dispõe sobre normas de lançamento em corpos hídricos dos efluentes de usinas de açúcar, com foco nos resíduos líquidos e sólidos (BRASIL, 1978; 1980).

Neste sentido, o descumprimento destas normativas implica na aplicação da Lei de crimes ambientais número 9.605 de 12 de fevereiro de 1998, que possui como objetivo principal a penalização legal e administrativa contra infrações de cunho ambiental derivadas de condutas e atividades lesivas que venham a comprometer o meio ambiente e a vida (BRASIL, 1998a).

Portanto, estas são as normativas gerais estabelecidas no Brasil que regulamentam a prática da aplicação de efluentes ao solo, corpos hídricos e em áreas agrícolas, entre outras providências ambientais, de forma que o não cumprimento destas diretrizes pode acarretar em multas e sanções penais ao infrator. Contudo, estas legislações a nível nacional muitas vezes não refletem as condições locais de cada região, sendo assim, alguns estados definem suas próprias legislações, baseando-se em características específicas da região, como clima, topografia, população e demanda hídrica.

### 2.1.2 Legislação estadual

No Espírito Santo, o governo do estado instituiu a Lei número 5.818 de 29 de dezembro de 1998, que dispõe sobre a política estadual dos recursos hídricos e estabelece o sistema integrado de gerenciamento e monitoramento destes recursos. Esta Lei estabelece normas gerais sobre a política de monitoramento dos corpos hídricos visando assegurar padrões de qualidade adequados aos usos, bem como melhorar o aproveitamento, gerenciamento da proteção, conservação, recuperação e o desenvolvimento das águas no domínio do estado (BRASIL, 1998b).

Além disso, o governo do estado juntamente com a Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEAMA) e o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), estabeleceram a Instrução Normativa número 007 de 21 de junho de 2006, que define critérios técnicos referentes à outorga para a diluição de efluentes em corpos d'água superficiais no domínio do estado do Espírito Santo, levando-se em consideração as características territoriais, topográficas, hídricas e ambientais locais (BRASIL, 2006).

No ano seguinte ao estabelecimento desta normativa, foi instituído o Decreto número 1.777 de 8 de janeiro de 2007, que regulamenta o sistema de licenciamento e controle das

atividades poluidoras ou degradadoras do meio ambiente, incluindo os lançamentos de efluentes oriundos das destilarias, entre eles a vinhaça (BRASIL, 2007).

Neste contexto, foi definida a Lei número 10.098 de 15 de outubro de 2013, que institui o cadastro técnico estadual destas atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras dos recursos ambientais, incluindo as destilarias de álcool implantadas ou que venham a ser instaladas no estado do Espírito Santo, permitindo o controle e a fiscalização ambiental por parte do governo do estado quanto a estas atividades (BRASIL, 2013).

Desta forma, ficam estabelecidas as normativas ambientais que regem quanto aos efluentes de diferentes origens e características no estado do Espírito Santo, baseando-se em suas condições e necessidades locais, entretanto, para que estas diretrizes sejam aplicadas, elas devem ser mais rigorosas e restritivas que as normativas nacionais.

## 2.2 USO AGRÍCOLA DE EFLUENTES

O uso agrícola de efluentes é considerado uma técnica que apresenta vantagens, pois permite o aproveitamento de efluentes em atividades produtivas, auxiliando na incorporação de nutrientes e matéria orgânica ao solo (JIANG *et al.*, 2012; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013). Entretanto, quando realizada sem critérios técnicos pode acarretar efeitos indesejáveis, como a diminuição nos índices de produção agrícola, bem como o comprometimento da estrutura do solo (CAMIOTTI *et al.*, 2009; LÓPEZ *et al.*, 2010; LAMAISON *et al.*, 2015).

Neste sentido, para a disposição de efluentes no solo, além dos aspectos da saúde humana e animal, deve ser considerado o seu potencial fertilizante e os efeitos sobre o solo e as plantas, tais como o potencial de salinização e sodificação, a capacidade de infiltração do solo e a toxicidade por íons específicos. Contudo, os possíveis efeitos da aplicação de efluentes nos atributos químicos e físicos do solo normalmente se pronunciam após longo período de aplicação, e sua intensidade depende da composição do efluente, das condições climáticas e tipo de solo (MEDEIROS *et al.*, 2005; KENIMER *et al.*, 2011).

Portanto, é comum ocorrer alterações nas características químicas e físicas do solo, decorrentes do uso de efluentes. Alguns autores, utilizando a vinhaça como fonte de adubação em cultivos agrícolas, observaram mudanças na composição química do solo, com elevação nos teores de nutrientes e matéria orgânica, além de melhorias nos índices de produtividade das culturas (ALMEIDA NETO *et al.*, 2009; BONINI *et al.*, 2014; LOPES *et al.*, 2014).

Segundo Palaretti *et al.* (2015), a aplicação de diferentes doses de vinhaça no solo culminou em uma elevação nos teores de nutrientes em uma área agrícola na região de

Jaboticabal, SP, possibilitando atingir uma produtividade do manjeriço sem diferenças significativas da obtida com a aplicação da adubação mineral.

De maneira semelhante, Ungaro *et al.* (2008) estudando o efeito da vinhaça no desenvolvimento inicial do girassol, mamona e amendoim em casa de vegetação, não observaram deficiências nutricionais ou efeitos tóxicos no tecido foliar das culturas com a aplicação da vinhaça. Em relação aos índices de produtividade, os resultados obtidos foram semelhantes à produtividade do sistema convencional, com a aplicação da adubação mineral.

Segundo Schultz *et al.* (2010), com a aplicação da vinhaça em diferentes doses no cultivo da cana-de-açúcar no município de Conceição da Barra, ES, foi constatado que a adubação com vinhaça associada à complementação nitrogenada proporcionou os melhores rendimentos de colmos frescos da cultura, em relação à produção obtida com a aplicação da adubação mineral, em áreas agrícolas cultivadas com cana-de-açúcar por quase 20 anos.

Sendo assim, o uso agrícola da vinhaça possui potencial para suprir as necessidades nutricionais de diferentes culturas, entretanto, o seu uso deve ser realizado com critérios técnicos, pois os possíveis efeitos indesejáveis decorrentes da aplicação da vinhaça, como a saturação do solo por excesso de cátions, entre eles o potássio e sódio, estão ligados diretamente a sua utilização inadequada (ROLIM *et al.*, 2013; CRUZ *et al.*, 2016).

Portanto, para a aplicação adequada da vinhaça deve ser levado em consideração, além da capacidade de suporte do solo e planta, às legislações que estabelecem padrões de utilização, logo, a sua aplicação em áreas agrícolas pode promover ganhos na produtividade de culturas, além de ser considerada uma maneira adequada de disposição final deste efluente (SILVA *et al.*, 2007; VASCONCELOS *et al.*, 2010; BASSO *et al.*, 2013).

Estudos demonstram que a aplicação deste resíduo ao solo, seja em áreas agrícolas ou não, apresenta-se como uma técnica eficiente de disposição final, pois o solo filtra este resíduo incorporando nutrientes que são requeridos pelas culturas e contribuem de maneira positiva com os cultivos agrícolas. Ao mesmo tempo, esta técnica demanda de um investimento menor, quando comparada a técnicas de tratamento e disposição de efluentes, que necessitam da construção de estruturas físicas, como rampas de escoamento, lagoas de estabilização e filtros aeróbicos e anaeróbicos (BERTONCINI, 2008; UYEDA *et al.*, 2013).

Além disso, pelo fato da distribuição geográfica dos recursos hídricos em relação à distribuição populacional, agrícola e industrial, nem sempre serem coerentes com a necessidade local, fontes alternativas de recursos para estas atividades produtivas, mesmo que sejam de qualidade inferior, especificamente em cultivos agrícolas, contribuem com significativos

benefícios sociais, econômicos e ambientais (BEVILACQUA e KOPSCHITZ, 2009; LIMA *et al.*, 2012; NAIR e TAHERZADEH, 2016).

Contudo, estes resíduos devem ser amostrados e analisados periodicamente, sendo os resultados confrontados com a legislação vigente, possibilitando definir se o mesmo demandará de tratamento para ser descartado nos corpos hídricos ou se poderá ser aplicado ao solo ou em áreas agrícolas, para determinada cultura.

### 2.3 CULTURA DO MILHO (*Zea mays* L.): ASPECTOS GERAIS

O milho é uma planta de ciclo curto, de fisiologia C4 e pertencente à classe monocotiledônea, família Poacea, gênero *Zea*, espécie *Zea mays*. Morfologicamente, a planta de milho é constituída por um colmo cilíndrico ereto com 1 a 4 m de altura, formada por nós e entrenós, apresentando inflorescências femininas (espigas) e masculinas (pendão), além de folhas lanceoladas, devidamente suportadas por um sistema radicular fasciculado (FANCELLI e DOURADO NETO, 2000).

Os primeiros registros do cultivo de milho datam de cerca de 7.300 anos atrás e foram encontrados em pequenas ilhas próximas ao litoral mexicano. A cultura se espalhou de forma rápida pelo México, sendo domesticada no Sudoeste mexicano e levada para o Sudeste. A partir disso, a cultura do milho foi disseminada para outras regiões tropicais da América, como Panamá e América do Sul (PINHO *et al.*, 2015).

No Brasil, o milho já era cultivado pelos índios antes da chegada dos portugueses. Para os índios guaranis este cereal era o principal ingrediente de sua dieta. Com a chegada dos portugueses, há pouco mais de 500 anos, o consumo aumentou e novos produtos à base de milho incorporaram-se aos hábitos alimentares dos brasileiros. Com as grandes navegações, que se tornaram comuns no século 16 e com o início da colonização do continente americano, o milho se expandiu para outras partes do mundo (MÔRO e FRITSCH NETO, 2015).

Inicialmente o milho produzido era o caboclo, o que atendia a demanda da época, porém com o crescimento demográfico associado ao desenvolvimento de novas tecnologias, foram sendo desenvolvidas outras variedades do milho. Atualmente no Brasil, aproximadamente 90% do milho produzido é transgênico ou híbrido, o que aumentou a produtividade por área e permitiu diminuir o ciclo da cultura, possibilitando mais de um cultivo por ano (MORAES *et al.*, 2015).

No Brasil o milho é uma cultura de interesse econômico e cultural, estando presente no país antes mesmo de sua descoberta, representando parte importante do Produto Interno Bruto

(PIB) e empregando grande quantidade de mão-de-obra em suas etapas de produção (IBGE, 2015; MÔRO e FRITSCHKE NETO, 2015). Estas características fazem da cultura do milho um dos principais cereais com contribuições para o desenvolvimento social e econômico no cenário nacional do agronegócio.

### 2.3.1 Cenário nacional

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, atrás apenas dos Estados Unidos e da China. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento, na safra 2014/2015 a produção de milho no Brasil atingiu 82,36 milhões de toneladas. O principal destino da safra são as indústrias de rações para animais e para atender ao consumo na mesa dos brasileiros. Ainda nesta safra, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, a cultura do milho foi cultivada em 15,22 milhões de hectares, com faturamento anual de aproximadamente R\$ 25,99 bilhões (CNA, 2016; CONAB, 2016).

A área plantada e a produtividade do milho por região no Brasil, na safra de 2014/2015, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Área plantada e produtividade do milho por região no Brasil, na safra de 2014/2015

Regiões do Brasil	Área plantada (Milhões de hectares)	Produção (Milhões de toneladas)
Norte	0,35	0,98
Nordeste	2,09	7,71
Sudeste	2,45	11,36
Sul	3,93	25,86
Centro-Oeste	6,40	36,45
Total	15,22	82,36

Fonte: CNA (2016) e CONAB (2016).

A cultura do milho é plantada em praticamente todo o território nacional, com a utilização das mais variadas tecnologias e estima-se que aproximadamente 20% da produção sejam destinadas ao autoconsumo nas unidades produtoras. Além disso, o milho participa em média com 64 e 66% na composição da ração destinada à avicultura e suinocultura, respectivamente (CARVALHO *et al.*, 2014).

Do total produzido no país, na safra de 2014/2015, 28,90 milhões de toneladas foram exportadas, principalmente para o Vietnã e Irã, o que representa em torno de 35,08% da produção nacional. Esta atividade participa com uma fatia expressiva do PIB, uma vez que o agronegócio representa aproximadamente 21,66% do PIB nacional (CNA, 2016).

Portanto, o milho é uma cultura de interesse para a economia do Brasil, sendo fonte de alimento e renda para pequenos e grandes produtores, e em muitos casos, constituindo a base alimentar das famílias em praticamente todos os estados brasileiros.

### 2.3.2 Importância econômica e social para o estado do Espírito Santo

No estado do Espírito Santo, na safra de 2014/2015 foi cultivada uma área de 21,81 mil hectares de milho, com uma produção de 58,22 mil toneladas, sendo cultivado predominantemente por agricultores familiares, com baixo nível tecnológico, o que envolveu cerca de 22,80 mil pessoas em toda a cadeia produtiva (IBGE, 2015). Desta forma, o agronegócio, em especial a agricultura envolvendo as etapas de produção do milho, representam uma parcela significativa na oferta de empregos no estado.

Em relação à região, no Sudeste o Espírito Santo é o segundo maior produtor de milho, ficando atrás apenas de Minas Gerais. Já no ranking nacional de produção por estado, o Espírito Santo ocupa a 18ª colocação, em uma lista em que os três primeiros colocados são Mato Grosso, Paraná e Goiás, com produção de 18,07, 15,82 e 9,08 milhões de toneladas, respectivamente (CONAB, 2016).

Com base nestes índices de produção, observa-se a importância desta cultura para o estado do Espírito Santo e para o Brasil, justificando o desenvolvimento de pesquisas que visam aprimorar as técnicas de produção de forma cada vez mais eficiente e com menores investimentos. Entre estas técnicas, tem-se uma atenção especial para o uso agrícola de efluentes, entre eles a vinhaça, apresentando algumas vantagens como a não dependência do produtor por grande quantidade de insumos externos, diminuição no custo de produção e destinação adequada deste resíduo, que apresenta potencial poluidor quando desposto sem critérios técnicos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O experimento foi conduzido em condições de campo durante os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES. O local está situado sob as coordenadas geográficas de longitude  $41^{\circ}32'58''$  W e latitude  $20^{\circ}47'11''$  S (Figura 1).

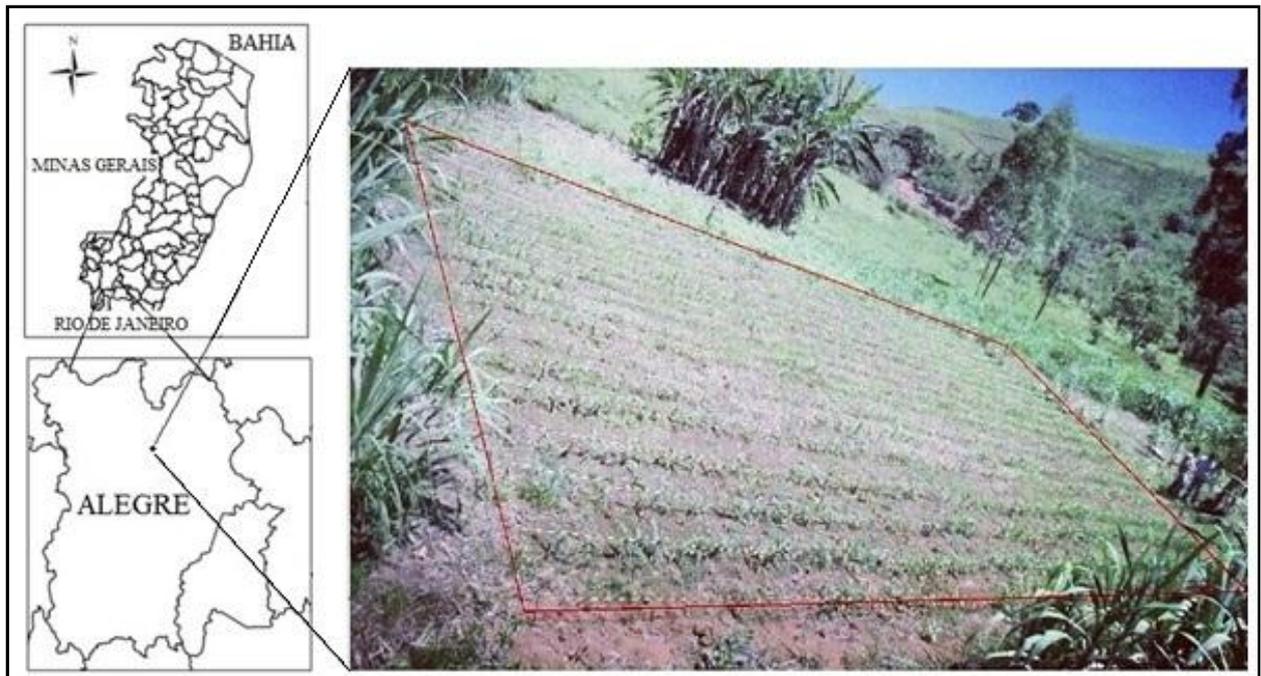


Figura 1. Localização da área experimental na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES.

Segundo a classificação internacional de Köppen o clima predominante na região é do tipo Cwa, caracterizado por inverno seco e verão chuvoso. A precipitação acumulada e a temperatura média mensal na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES, durante o período de estudo (Figura 2), foram obtidas por meio da estação meteorológica automática de Alegre - A617 (INMET, 2016) e por meio de um pluviômetro instalado na área de estudo.

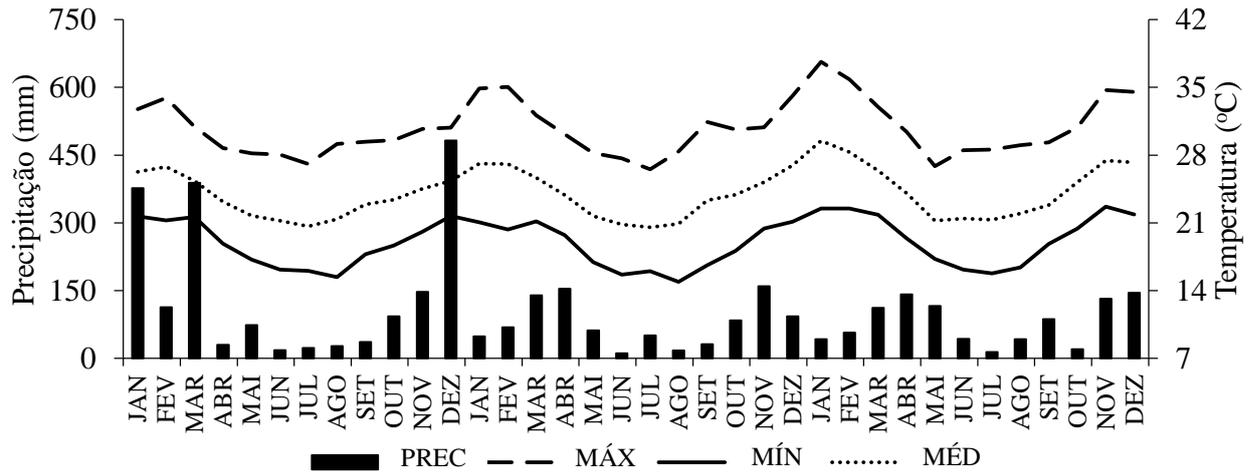


Figura 2. Precipitação acumulada mensal (PREC) e temperatura máxima (MÁX), mínima (MÍN) e média (MÉD) mensal, na comunidade rural Jerusalém, município de Alegre, ES, durante os anos de 2013, 2014 e 2015.

Fonte: INMET (2016) para temperatura e pluviômetro instalado na área de estudo para a precipitação.

Antecedendo a instalação do experimento, realizou-se uma amostragem do solo em três profundidades (0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm), para a caracterização química e física (Tabela 2).

Tabela 2. Atributos químicos e físicos do solo nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, em amostras coletadas antes da instalação do experimento

Atributos químicos <sup>1</sup>	Profundidade (cm)			
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	
pH	5,00	4,80	5,00	
Fósforo (mg dm <sup>-3</sup> )	3,17	3,25	2,90	
Potássio (mg dm <sup>-3</sup> )	27,00	31,00	27,00	
Sódio (mg dm <sup>-3</sup> )	5,78	2,90	2,78	
Cálcio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,43	1,12	1,16	
Magnésio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,58	0,25	0,19	
Alumínio (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,32	0,20	0,22	
H+Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	3,35	2,74	2,85	
SB (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,09	1,45	1,42	
t (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,41	1,65	1,64	
T (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,44	4,19	4,27	
V (%)	24,54	34,60	33,25	
MO (g kg <sup>-1</sup> )	3,12	2,34	2,12	
Atributos físicos <sup>2</sup>	Profundidade (cm)			
	0 a 10	10 a 20	20 a 40	
	Areia (%)	53	55	55
	Silte (%)	5	5	6
Argila (%)	42	40	39	

H+Al: hidrogênio + alumínio. SB: soma de bases trocáveis. t: capacidade de troca catiônica efetiva. T: capacidade de troca catiônica a pH 7,0. V: índice de saturação em bases. MO: matéria orgânica. <sup>1</sup>Metodologia (EMBRAPA, 2009). <sup>2</sup>Metodologia (ALMEIDA *et al.*, 2012).

Além disso, também foi realizada em torno de 60 dias antes de se iniciar o plantio, a correção da acidez do solo. A quantidade de calcário aplicada foi calculada com base no método de saturação por bases, visando elevar esse valor a 60%. A calagem foi feita a lanço, não sendo incorporada, nos três anos agrícolas (PREZOTTI *et al.*, 2007; ALVARENGA *et al.*, 2010).

O solo na área de estudo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, nas três profundidades estudadas (EMBRAPA, 2013).

O controle das plantas daninhas foi feito de forma manual, com roçagem e capina manual. Este controle foi feito de maneira periódica, sempre que a população de plantas daninhas começava a germinar, para evitar competição por água e nutrientes com a cultura, principalmente, no estágio inicial de desenvolvimento das plantas de milho.

### 3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Em cada ano experimental foram realizados dois cultivos independentes, mas simultâneos, sendo um utilizado para a avaliação da produção de grãos e o outro para a produção de forragem. No ano de 2013, o milho foi semeado no dia 12 de outubro. No ano de 2014, em 2 de agosto e no ano de 2015 em 8 de agosto.

Utilizou-se o milho híbrido AG 1051, categoria S1 com garantia de germinação mínima de 85% e pureza mínima de 98%, sendo semeadas três sementes por cova, de forma que após a germinação realizou-se o desbaste deixando uma única planta por cova.

Cada cultivo foi instalado seguindo um esquema de parcelas subdivididas em um delineamento em blocos casualizados com seis tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram compostos pela adubação mineral pós-plantio (NPK) e cinco doses de vinhaça, correspondentes a 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. A adubação mineral foi baseada no Manual de Recomendação de Adubação e Calagem para o estado do Espírito Santo (PREZOTTI *et al.*, 2007). Como fonte de adubação mineral, utilizou-se a ureia (45% N), superfosfato simples (18% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e cloreto de potássio (60% K<sub>2</sub>O).

O potássio, por ser o elemento em maior concentração na vinhaça, foi estabelecido como o elemento principal para o cálculo da dose de vinhaça a ser aplicada, baseando-se na metodologia definida por Ribeiro *et al.* (1999). A aplicação da vinhaça supriu 100% da necessidade de potássio e fósforo da cultura, entretanto, para o nitrogênio não supriu a necessidade total, neste caso, esta carência de nitrogênio foi compensada com o uso de ureia.

A área total ocupada pelos dois cultivos no experimento foi de 380,16 m<sup>2</sup>, com parcelas experimentais medindo 2,20 x 3,60 m (7,92 m<sup>2</sup>), correspondendo a uma área de 190,08 m<sup>2</sup> por

cultivo. Cada parcela experimental era fixa, ou seja, o experimento foi montado no mesmo local nas três safras, sendo cada parcela composta por 44 plantas cultivadas no espaçamento de 0,20 m entre covas e 0,90 m entre linhas, com 10 plantas úteis (avaliadas) e 34 plantas de bordaduras (não avaliadas). Para cada ano agrícola utilizou-se o mesmo esquema de distribuição das parcelas experimentais. Na Figura 3 é possível observar a ilustração de uma parcela experimental.

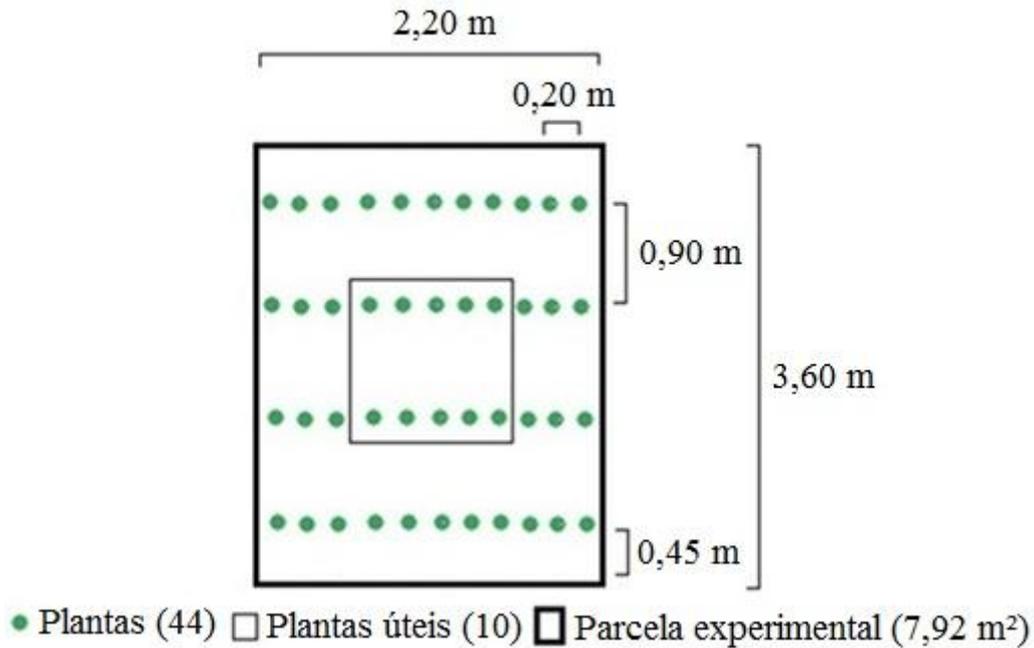


Figura 3. Representação esquemática de uma parcela experimental.

### 3.3 APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS (ADUBAÇÃO MINERAL E VINHAÇA)

Na Tabela 3, são apresentados os valores de NPK (kg ha<sup>-1</sup>) fornecidos a cultura por meio da adubação mineral.

Tabela 3. Adubação mineral NPK (kg ha<sup>-1</sup>) fornecida à cultura nos três anos agrícolas

Anos Agrícolas	Recomendação (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>1</sup>		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
2013	120	105	110
2014	120	105	110
2015	120	105	110

<sup>1</sup>Metodologia (PREZOTTI *et al.*, 2007).

A vinhaça utilizada no experimento foi coletada em uma unidade de produção de aguardente próxima ao local onde foi realizado o experimento. Para a sua caracterização química uma amostra de 800 mL foi coletada e encaminhada ao laboratório (Tabela 4). Em cada ano agrícola foi realizada uma nova análise na vinhaça antes de sua aplicação.

Tabela 4. Caracterização química da vinhaça utilizada nos três anos agrícolas

Característica <sup>1</sup>	Valor		
	2013	2014	2015
pH (potencial hidrogeniônico)	3,57	3,05	3,19
Nitrogênio (mg L <sup>-1</sup> )	250,00	326,00	288,00
Fósforo (mg L <sup>-1</sup> )	1.812,00	1.943,00	2.024,00
Potássio (mg L <sup>-1</sup> )	3.218,00	2.981,00	2.743,00
Cálcio (mg L <sup>-1</sup> )	70,00	54,00	62,00
Magnésio (mg L <sup>-1</sup> )	93,00	71,00	64,00
Enxofre (mg L <sup>-1</sup> )	220,00	162,00	139,00
Ferro (mg L <sup>-1</sup> )	15,00	37,00	48,00
Zinco (mg L <sup>-1</sup> )	2,00	6,00	14,00
Cobre (mg L <sup>-1</sup> )	7,00	12,00	27,00
Manganês (mg L <sup>-1</sup> )	4,00	8,00	9,00
Boro (mg L <sup>-1</sup> )	1,00	2,00	5,00
Sódio (mg L <sup>-1</sup> )	340,00	286,00	300,00
Alumínio (mg L <sup>-1</sup> )	1,00	1,00	3,00
Matéria orgânica total (mg L <sup>-1</sup> )	5.660,00	4.430,00	5.090,00

<sup>1</sup>Metodologia (MAPA, 2007b).

A vinhaça foi aplicada manualmente com auxílio de um regador com saída tipo chuveiro, controlando para que não ocorresse o escoamento superficial. O fornecimento da vinhaça foi realizado em uma única aplicação, quando a cultura apresentou de 3 a 5 folhas. Neste momento, também foi realizada a adubação mineral pós-plantio (NPK), para as parcelas correspondentes a adubação mineral.

O aporte de nutrientes e matéria orgânica ao solo decorrente da aplicação das diferentes doses de vinhaça nos três anos agrícolas é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Aporte de nutrientes e matéria orgânica (kg ha<sup>-1</sup>) decorrente da aplicação das diferentes doses de vinhaça nos três anos agrícolas

Doses de vinhaça (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	2013													
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Na	Al	MO
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----													
50	12,50	90,60	160,90	3,50	4,65	11,00	0,75	0,10	0,35	0,20	0,05	17,00	0,05	278,00
100	25,00	181,20	321,80	7,00	9,30	22,00	1,50	0,20	0,70	0,40	0,10	34,00	0,10	556,00
150	37,50	271,80	482,70	10,50	13,95	33,00	2,25	0,30	1,05	0,60	0,15	51,00	0,15	834,00
200	50,00	362,40	643,60	14,00	18,60	44,00	3,00	0,40	1,40	0,80	0,20	68,00	0,20	1.112,00
250	62,50	453,00	804,50	17,50	23,25	55,00	3,75	0,50	1,75	1,00	0,25	85,00	0,25	1.390,00
Doses de vinhaça (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	2014													
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Na	Al	MO
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----													
50	16,30	97,15	149,05	2,70	3,55	8,10	1,85	0,30	0,60	0,40	0,10	14,30	0,05	221,50
100	32,60	194,30	298,10	5,40	7,10	16,20	3,70	0,60	1,20	0,80	0,20	28,60	0,10	443,00
150	48,90	291,45	447,15	8,10	10,65	24,30	5,55	0,90	1,80	1,20	0,30	42,90	0,15	664,50
200	65,20	388,60	596,20	10,80	14,20	32,40	7,40	1,20	2,40	1,60	0,40	57,20	0,20	886,00
250	81,50	485,75	745,25	13,50	17,75	40,50	9,25	1,50	3,00	2,00	0,50	71,50	0,25	1.107,50
Doses de vinhaça (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	2015													
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Na	Al	MO
	-----kg ha <sup>-1</sup> -----													
50	14,40	101,20	137,15	3,10	3,20	6,95	2,40	0,70	1,35	0,45	0,25	15,00	0,15	254,50
100	28,80	202,40	274,30	6,20	6,40	13,90	4,80	1,40	2,70	0,90	0,50	30,00	0,30	509,00
150	43,20	303,60	411,45	9,30	9,60	20,85	7,20	2,10	4,05	1,35	0,75	45,00	0,45	763,50
200	57,60	404,80	548,60	12,40	12,80	27,80	9,60	2,80	5,40	1,80	1,00	60,00	0,60	1.018,00
250	72,00	506,00	685,75	15,50	16,00	34,75	12,00	3,50	6,75	2,25	1,25	75,00	0,75	1.272,50

### 3.4 AVALIAÇÕES

#### 3.4.1 Avaliação dos atributos químicos do solo

No cultivo correspondente a produção de grãos, foi realizado o estudo das alterações nos atributos químicos do solo decorrente da aplicação da vinhaça e adubação mineral, sendo coletada dentro de cada parcela experimental amostras de solo em três profundidades (0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm). O solo foi amostrado com auxílio de um trado, após a colheita dos grãos nos três anos agrícolas.

Antes da instalação do experimento a área de estudo não havia recebido vinhaça e as características físico-químicas do solo nestas condições foram apresentadas anteriormente na Tabela 2, por meio de uma amostragem do tipo composta, obtida por meio da coleta em caminamento zigue-zague de 20 subamostras simples.

Após secas ao ar e passadas em peneiras de 2 mm, as amostras de solo foram encaminhadas ao laboratório para a determinação dos valores de pH e os teores de fósforo, potássio, sódio, cálcio, magnésio, alumínio e matéria orgânica, segundo a metodologia preconizada pela EMBRAPA (2009).

#### 3.4.2 Avaliação dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho

Também nas parcelas correspondentes a produção de grãos foi realizada a avaliação do estado nutricional da cultura, por meio da análise do tecido foliar. As folhas utilizadas nas análises químicas foram amostradas quando 50% das plantas de milho apresentaram pendoamento, aproximadamente na 10<sup>a</sup> semana após a germinação. Coletou-se o terço médio da folha oposta e abaixo da espiga (folha diagnose), na área útil de cada parcela experimental. Segundo metodologia preconizada por Coelho e França (1995), este é o momento mais indicado para a realização da análise nutricional no tecido foliar das plantas de milho.

As amostras de tecido foliar das plantas de milho foram acondicionadas em sacos de papel, identificadas e levadas à estufa regulada a 65 °C por 72 horas. Decorrido este período, as mesmas foram passadas pelo moinho de facas para posterior análise nutricional. Nas amostras foliares foram analisados os teores de macronutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio; e, micronutrientes: boro, cobre, ferro e zinco. Para a determinação dos teores foliares de nutrientes utilizou-se a metodologia preconizada pela EMBRAPA (2009).

### 3.4.3 Avaliação da produção da cultura do milho

Para a produção de forragem nos três anos agrícolas o cultivo foi realizado com o corte em torno de 120 dias após a germinação. As características agronômicas avaliadas na cultura, no momento da colheita foram: massa fresca e seca da parte aérea (g) e produção de forragem (t ha<sup>-1</sup>). Para a obtenção da massa fresca, as 10 plantas úteis por parcela foram pesadas logo após a colheita, em seguida foram acondicionadas em sacos de papel, identificadas e levadas à estufa com circulação de ar forçada, mantida a temperatura de 65 °C até atingirem peso constante, cerca de 72 horas. Após a secagem, o material foi pesado novamente para a obtenção da massa seca.

Para a obtenção da produção de forragem, multiplicou-se a média da massa fresca obtida em cada parcela pelo estande final que foi de 55.555 plantas por hectare.

No cultivo realizado para a produção de grãos, a colheita foi realizada em torno de 130 dias após a germinação, quando as espigas apresentaram características de grão seco. As variáveis agronômicas avaliadas nas espigas de milho no momento da colheita foram: peso da espiga completa (g), peso dos grãos após o debulhamento das espigas (g) e a produção de grãos por hectare (kg ha<sup>-1</sup>), que foi obtido multiplicando-se o peso médio de grãos por espiga pela estimativa da produção média de espigas por hectare.

Em todos os cultivos as colheitas foram realizadas de forma manual.

## 3.5 MANEJO DA IRRIGAÇÃO

O manejo da irrigação adotado no experimento foi via clima, sendo a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) estimada com base na metodologia de Hargreaves-Samani (1985), Equação 1.

$$ET_0 = 0,0023 (R_a/2,45) (T_{max} - T_{min})^{0,5} (T_{med} + 17,80) \quad (1)$$

Em que,

ET<sub>0</sub> = Evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>).

R<sub>a</sub> = Radiação solar no topo da atmosfera, expressa em equivalente de evaporação (mm dia<sup>-1</sup>).

T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub> e T<sub>med</sub> = Temperaturas máxima, mínima e média do ar, respectivamente (°C).

As variáveis meteorológicas (precipitação, temperaturas máxima, mínima e média), necessárias na estimativa da  $ET_0$  foram obtidas por meio da estação meteorológica automática de Alegre - A617 (INMET, 2016). A radiação solar ( $R_a$ ) possui valor tabelado e foi ajustada em função da latitude local e do mês de referência (CONCEIÇÃO e MANDELLI, 2005).

A lâmina de irrigação aplicada para suprir a necessidade hídrica da cultura foi baseada na Equação 2.

$$L_i = \frac{(ET_c - P_e) \times 100}{E_i} \quad (2)$$

Em que,

$L_i$  = Lâmina de irrigação ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$ET_c$  = Evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$P_e$  = Precipitação efetiva (mm).

$E_i$  = Eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (%).

A irrigação foi realizada com sistema de aspersão convencional móvel. Para determinar a eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação ( $E_i$ ), a uniformidade de aplicação de água no sistema foi avaliada conforme metodologia proposta por Christiansen (1942) e citada por Bernardo *et al.* (2006), apresentando um Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) de 86,10, 87,60 e 84,00%, para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente.

A evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) foi determinada por meio da Equação 3 (ALLEN *et al.*, 1998).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

Em que,

$ET_c$  = Evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$K_c$  = Coeficiente de cultura (adimensional).

$ET_0$  = Evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Para a cultura do milho utilizou-se um Kc no primeiro estágio de 0,30, no segundo de 0,75, no terceiro de 1,20 e no quarto estágio de 0,50 (MANTOVANI *et al.*, 2009).

O tempo de irrigação, que foi o período em que o sistema de irrigação permaneceu em funcionamento para aplicar a lâmina de irrigação necessária ( $L_i$ ) para suprir a necessidade hídrica da cultura, foi determinada por meio da Equação 4.

$$T_i = \frac{L_i}{IA_i} \quad (4)$$

Em que,

$T_i$  = Tempo de irrigação (h).

$L_i$  = Lâmina de irrigação ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

$IA_i$  = Intensidade de aplicação média dos emissores ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

A intensidade de aplicação média dos emissores ( $IA_i$ ) foi de 17,40, 18,55 e 17,20  $\text{mm h}^{-1}$ , para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente.

Antes da irrigação, foram retiradas amostras de solo ao acaso em oito pontos da área irrigada, na profundidade efetiva do sistema radicular da cultura para a determinação das características físico-hídricas (Tabela 6). Desta forma, foi realizada uma irrigação inicial para repor a umidade do solo na capacidade de campo. Em seguida foi estabelecido um turno de rega fixo de três dias e a capacidade de campo foi repostada com o manejo via clima, baseando-se na evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ). Este procedimento foi realizado em cada um dos três anos agrícolas.

Tabela 6. Caracterização físico-hídrica do solo na área de estudo

Anos agrícolas	CC <sup>1</sup>	PM <sup>2</sup>	Ds <sup>3</sup>
	% em peso		$\text{g cm}^{-3}$
2013	27,80	13,20	0,97
2014	31,70	15,00	0,92
2015	38,40	18,60	0,98

<sup>1</sup>Capacidade de campo e <sup>2</sup>Ponto de murcha permanente, ambos determinados com extrator de membranas de Richards a 0,01 e 1,50 mPa, respectivamente; <sup>3</sup>Densidade do solo, determinada pelo método da proveta (EMBRAPA, 2009).

A evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e a lâmina de irrigação aplicada ( $L_i$ ) nos três anos agrícolas podem ser observadas na Figura 4 (A e B).

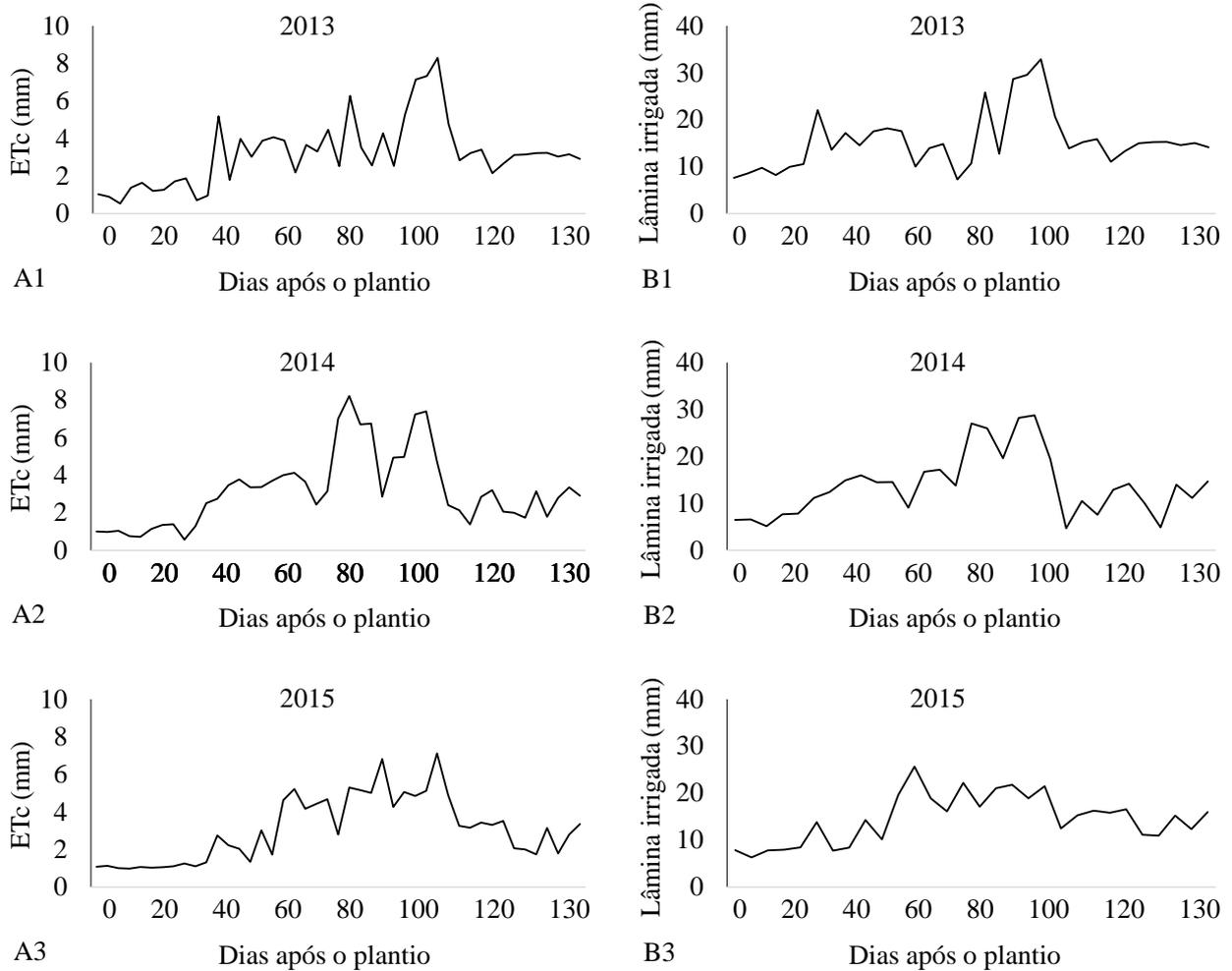


Figura 4. Evapotranspiração da cultura (ETc) (A1, 2 e 3) e lâmina de irrigação aplicada ( $L_i$ ) (B1, 2 e 3) durante o período de cultivo nos três anos agrícolas.

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos foram analisados separadamente para cada ano agrícola (2013, 2014 e 2015). As análises estatísticas dos atributos químicos do solo, dos teores nutricionais do tecido foliar e da produção da cultura do milho, foram feitas por meio de análise de variância, adotando 5% de probabilidade, utilizando-se um esquema de parcelas subdivididas em um delineamento em blocos casualizados.

A comparação das médias dos tratamentos (doses de vinhaça), em relação à testemunha controle (adubação mineral), foi realizada pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade, enquanto as médias das profundidades foram comparadas entre si, para cada adubação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Por sua vez, apenas a influência das diferentes doses de vinhaça aplicadas nas características avaliadas foi feita por meio da análise de regressão, adotando 5% de probabilidade (BANZATTO e KRONKA, 2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO

Por meio dos resultados obtidos, após a análise de variância (Anexos A, B e C), verificou-se que a aplicação de vinhaça no cultivo do milho proporcionou alterações significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) nos atributos químicos do solo onde foi realizado o experimento.

Observando os valores médios dos atributos químicos do solo no ano agrícola de 2013, apresentados na Tabela 7, nota-se que no solo onde foi aplicada a vinhaça, na profundidade de 0 a 10 cm, houve maiores valores de pH e teores de fósforo, potássio, sódio, cálcio, magnésio e matéria orgânica, quando comparada as demais profundidades estudadas. Para estas mesmas variáveis, não foram observadas diferenças entre os tratamentos nas demais profundidades. Por sua vez, os teores de alumínio apresentaram nas faixas de profundidades estudadas, valores superiores em comparação à camada superior do solo (até 10 cm).

Tabela 7. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2013

Atributo químico	Prof. (cm)	Tratamentos					
		NPK t ha <sup>1</sup>	50	100	150	200	250
pH	0 a 10	5,25 A a	4,80 A a	4,80 A a	5,52 A a	5,77 A a	6,15 A a
	10 a 20	4,65 B a	3,75 B a	3,85 B a	4,27 B a	5,20 B a	5,50 B a
	20 a 40	4,55 B a	3,42 B b	3,77 B b	4,02 B a	4,97 B a	5,00 B a
P (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	11,61 A a	12,06 A a	14,68 A a	14,79 A a	19,00 A b	22,63 A b
	10 a 20	8,78 B a	8,93 B a	9,97 B a	10,61 B a	12,27 B b	15,93 B b
	20 a 40	6,09 C a	6,46 C a	6,59 C a	7,09 C a	8,57 C b	10,23 C b
K (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	87,00 A a	77,15 A a	90,75 A a	91,75 A a	105,75 A b	118,75 A b
	10 a 20	75,00 B a	77,05 A a	78,00 B a	84,50 B a	87,50 B b	90,00 B b
	20 a 40	64,25 C a	58,50 B a	64,43 C a	74,75 C a	75,25 C b	76,50 C b
Na (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	3,48 A a	3,02 A a	4,53 A a	4,55 A a	5,71 A b	6,21 A b
	10 a 20	2,48 B a	2,28 B a	2,44 B b	2,62 B a	3,26 B b	4,43 B b
	20 a 40	1,18 C a	1,03 C a	1,30 C a	1,96 C a	2,46 C b	2,69 C b
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	1,42 A a	1,58 A a	1,81 A a	2,10 A a	2,29 A b	2,38 A b
	10 a 20	1,06 B a	0,82 B a	0,94 B a	0,94 B a	1,61 B b	2,36 A b
	20 a 40	0,91 B a	0,60 B a	0,69 B a	0,69 B a	1,26 B b	1,37 B b
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,65 A a	0,62 A a	0,63 A a	0,68 A a	0,75 A b	0,81 A b
	10 a 20	0,57 A a	0,55 A a	0,59 A a	0,61 A a	0,65 A b	0,74 A b
	20 a 40	0,54 B a	0,51 B a	0,54 B a	0,55 B a	0,60 B b	0,61 B b
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,48 B a	0,52 B a	0,42 B a	0,40 B a	0,37 B b	0,35 B b
	10 a 20	0,52 A a	0,57 A a	0,49 A a	0,47 A a	0,44 A b	0,39 A b
	20 a 40	0,54 A a	0,57 A a	0,52 A a	0,51 A a	0,47 A b	0,41 A b
MO (g kg <sup>1</sup> )	0 a 10	5,75 A a	5,96 A a	7,67 A a	7,78 A a	9,17 A b	10,70 A b
	10 a 20	4,01 B a	3,51 B a	4,07 B a	5,00 B a	6,02 B b	8,25 B b
	20 a 40	2,85 C a	2,55 C a	2,85 C a	3,35 C a	3,70 C b	6,33 C b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Analisando a variação dos atributos químicos do solo nas profundidades estudadas, nota-se que assim como ocorreu com a aplicação da vinhaça, com a adubação mineral, exceto para o teor de alumínio, houve maiores concentrações dos demais atributos na camada de 0 a 10 cm, em comparação as demais profundidades estudadas. Estes resultados obtidos podem ser justificados, em parte, pela baixa mobilidade do fósforo no solo, fazendo com que ocorra um acúmulo na camada superior (BASSO *et al.*, 2005).

Além disso, o solo na área de estudo é um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, tendo como característica baixa fertilidade natural e lenta infiltração de água, devido à elevada coesão dos agregados, favorecendo uma menor lixiviação de cátions, o que contribui diretamente para o aumento da concentração na camada superior do solo (EMBRAPA, 2013), justificando em parte o fato da adubação mineral e vinhaça não terem alterado os atributos químicos do solo na profundidade de 10 a 20 e 20 a 40 cm, no primeiro ano, em comparação aos resultados obtidos na profundidade de até 10 cm.

Nota-se que, com exceção dos valores de pH, os teores de fósforo, potássio, sódio, cálcio, magnésio, alumínio e matéria orgânica no solo, obtidos com o fornecimento da adubação mineral, no ano agrícola de 2013, não diferiram das médias obtidas com a aplicação das doses de vinhaça correspondentes a 50, 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Por sua vez, para estes mesmos atributos, quando aplicadas as doses de 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, houve diferença da média obtida com a aplicação da adubação mineral. Estes resultados podem ser associados ao aporte de nutrientes e matéria orgânica ao solo, advindos da aplicação das maiores doses de vinhaça (Tabelas 4 e 5).

Por outro lado, observa-se na Tabela 8, referente ao ano de 2014, que apesar da vinhaça ter sido aplicada na camada superficial do solo, neste ano, houve de forma considerável alterações nos atributos químicos do solo em todas as profundidades estudadas, com teores superiores aos obtidos com a aplicação da adubação mineral, nas doses correspondentes a 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, em comparação aos atributos químicos do solo nas parcelas correspondentes a adubação mineral e demais doses aplicadas (50, 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), principalmente para os teores de potássio, sódio, cálcio e magnésio, o que implica que houve uma percolação destes cátions até a profundidade de 20 a 40 cm.

Estes resultados também foram obtidos por outros pesquisadores, que ao aplicarem a vinhaça ao solo observaram que com o aumento no número de aplicações a tendência é ocorrer uma maior lixiviação destes cátions, enquanto em uma única aplicação é comum que ocorra um acúmulo apenas na camada superficial do solo (CAMIOTTI *et al.*, 2009; PAULINO *et al.*, 2011; BASSO *et al.*, 2013).

Tabela 8. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2014

Atributo Químico	Prof. (cm)	Tratamentos					
		NPK t ha <sup>1</sup>	50	100	150	200	250
pH	0 a 10	5,00 A a	5,20 A a	5,20 A a	5,67 A a	6,32 A b	6,51 A b
	10 a 20	4,80 A a	4,42 B a	4,57 A a	4,87 A a	5,85 A b	6,05 A b
	20 a 40	4,75 A a	4,40 B a	4,87 A a	4,32 B a	5,75 B b	5,50 B b
P (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	13,06 A a	14,51 A a	20,26 A b	23,18 A b	23,22 A b	27,60 A b
	10 a 20	9,00 B a	10,26 B a	13,28 B b	16,14 B b	18,22 B b	22,32 B b
	20 a 40	6,09 C a	5,22 C a	7,12 C b	8,87 C b	10,15 C b	10,17 C b
K (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	61,18 A a	100,67 A b	106,74 A b	118,35 A b	119,10 A b	122,15 A b
	10 a 20	61,32 A a	90,83 B b	93,02 B b	100,11 B b	102,27 B b	107,17 B b
	20 a 40	43,21 B a	58,47 C b	70,19 C b	73,04 C b	81,12 C b	82,70 C b
Na (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	3,20 A a	3,61 A a	3,66 A a	4,91 A b	5,14 A b	5,20 A b
	10 a 20	2,48 B a	2,78 B a	3,27 A a	4,06 A b	4,90 A b	4,52 A b
	20 a 40	2,01 B a	2,19 B a	2,49 B a	2,59 B b	2,63 B b	2,85 B b
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	1,41 A a	1,90 A a	2,08 A b	2,10 A b	2,42 A b	2,33 A b
	10 a 20	1,40 A a	1,48 A a	1,94 A b	2,10 A b	2,20 A b	2,25 A b
	20 a 40	1,00 B a	1,00 B a	1,15 B b	1,18 B b	1,33 B b	1,45 B b
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,68 A a	0,69 A a	0,65 A a	0,77 A b	0,89 A b	0,94 A b
	10 a 20	0,56 B a	0,58 B a	0,60 B a	0,69 B b	0,82 B b	0,80 B b
	20 a 40	0,51 C a	0,52 C a	0,54 C a	0,61 C b	0,70 C b	0,70 C b
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,49 B a	0,54 B a	0,49 B a	0,44 B a	0,42 B b	0,38 B b
	10 a 20	0,53 B a	0,60 B a	0,56 B a	0,50 B a	0,44 B b	0,40 B b
	20 a 40	0,65 A a	0,69 A a	0,64 A a	0,58 A a	0,49 A b	0,46 A b
MO (g kg <sup>1</sup> )	0 a 10	6,00 A a	6,06 A a	7,35 A b	7,88 A b	8,41 A b	12,22 A b
	10 a 20	2,51 B a	2,55 B a	4,70 B b	4,80 B b	5,11 B b	8,74 B b
	20 a 40	1,16 C a	1,79 C a	2,48 C b	2,78 C b	3,00 C b	3,13 C b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De forma semelhante aos anos anteriores, no ano agrícola de 2015 (Tabela 9), a aplicação da vinhaça elevou os atributos químicos do solo em relação à adubação mineral, principalmente nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm. Estas alterações estão associadas ao aporte de nutrientes e matéria orgânica (Tabelas 4 e 5), advindos do efluente. Outro aspecto relacionado com os resultados é a mineralização da matéria orgânica, a qual eleva o pH do solo para valores próximos da neutralidade, tornando o ambiente mais alcalino e conseqüentemente aumentando a disponibilidade de cátions, entre eles o potássio, sódio, cálcio e magnésio (GUNKEL *et al.*, 2007; HAGVALL *et al.*, 2015), assim como observado nos resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 9. Valores médios dos atributos químicos obtidos no solo cultivado com milho em função da adubação mineral e vinhaça nas profundidades estudadas na safra do ano agrícola de 2015

Atributo químico	Prof. (cm)	Tratamentos					
		NPK t ha <sup>1</sup>	50	100	150	200	250
pH	0 a 10	4,86 A a	5,52 A a	5,82 A b	5,98 A b	6,37 A b	6,72 A b
	10 a 20	4,61 A a	4,75 A a	5,25 A b	5,70 A b	6,37 A b	6,55 A b
	20 a 40	4,02 B a	3,27 B a	4,85 B b	5,17 B b	6,00 B b	6,12 B b
P (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	13,15 A a	21,13 A b	21,15 A b	23,49 A b	26,65 A b	28,32 A b
	10 a 20	9,13 A a	19,93 A b	19,95 A b	23,10 A b	23,81 A b	23,84 A b
	20 a 40	5,58 B a	9,25 B b	9,72 B b	11,51 B b	16,09 B b	16,65 B b
K (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	69,18 A a	104,57 A b	106,22 A b	114,05 A b	126,95 A b	124,16 A b
	10 a 20	58,00 B a	86,09 B b	86,55 B b	87,31 B b	91,12 B b	101,60 B b
	20 a 40	53,21 B a	74,87 B b	76,50 B b	76,89 B b	83,47 B b	89,63 B b
Na (mg dm <sup>3</sup> )	0 a 10	2,89 A a	3,91 A b	4,83 A b	5,20 A b	5,93 A b	5,60 A b
	10 a 20	2,72 A a	3,86 A b	4,06 B b	5,05 A b	5,60 A b	5,60 A b
	20 a 40	1,15 B a	1,75 B b	2,36 B b	3,60 B b	3,61 B b	4,09 B b
Ca (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	1,79 A a	1,82 A a	1,98 A a	3,39 A b	4,00 A b	4,12 A b
	10 a 20	1,40 B a	1,42 B a	1,59 B a	1,97 B b	2,49 B b	2,79 B b
	20 a 40	1,37 B a	1,40 B a	1,58 B a	1,92 B b	2,15 B b	2,51 B b
Mg (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,71 A a	0,71 A a	0,75 A a	0,80 A b	0,92 A b	0,98 A b
	10 a 20	0,65 A a	0,64 A a	0,67 A a	0,80 A b	0,92 A b	0,97 A b
	20 a 40	0,58 B a	0,53 B a	0,62 B a	0,72 B b	0,79 B b	0,91 B b
Al (cmol <sub>c</sub> dm <sup>3</sup> )	0 a 10	0,58 B a	0,60 B a	0,57 B a	0,56 B a	0,43 B b	0,41 B b
	10 a 20	0,65 A a	0,68 A a	0,67 A a	0,62 A a	0,49 A b	0,47 A b
	20 a 40	0,68 A a	0,68 A a	0,68 A a	0,64 A a	0,52 A b	0,48 A b
MO (g kg <sup>1</sup> )	0 a 10	6,18 A a	6,36 A a	7,97 A b	9,43 A b	12,40 A b	14,18 A b
	10 a 20	3,92 B a	5,08 B a	5,10 B b	6,11 B b	6,67 B b	7,33 B b
	20 a 40	1,52 C a	1,64 C a	2,08 C b	3,20 C b	3,80 C b	3,88 C b

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Nota-se que as alterações nos atributos químicos do solo foram mais expressivas para as profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm, em comparação à profundidade de 20 a 40 cm. No entanto, os teores de alumínio tiveram uma diminuição em sua concentração na profundidade de até 10 cm, em comparação as demais profundidades (Tabelas 7, 8 e 9). Estes resultados obtidos podem ser associados ao fato de ter sido realizada a correção da acidez potencial do solo com o uso de calcário, antes de se iniciar cada cultivo. Como a correção foi realizada na camada superior do solo não atingiu as profundidades de 10 a 20 e 20 a 40 cm, o que justifica o aumento no teor de alumínio nestas profundidades.

Além disso, a matéria orgânica fornecida ao solo via vinhaça foi-se acumulando na profundidade de até 10 cm, em comparação as demais profundidades, nos três anos agrícolas (Tabelas 7, 8 e 9). Neste caso, a matéria orgânica possui a capacidade de complexar o alumínio trocável, devido à precipitação na forma de óxido de alumínio, deixando-o menos disponível no

solo (CAMILOTTI *et al.*, 2009; HAGVALL *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2017), conseqüentemente, diminuindo a sua concentração nesta profundidade.

Estes resultados obtidos podem ser associados ao fato da vinhaça utilizada no presente estudo conter em sua composição em torno de  $5,0 \text{ g L}^{-1}$  de matéria orgânica (Tabelas 4 e 5), o que aumentou diretamente o seu teor no solo, principalmente nas parcelas que receberam as maiores doses de vinhaça ( $200$  e  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ).

Do mesmo modo, nos três anos agrícolas, a aplicação da vinhaça elevou o pH do solo na profundidade de 0 a 10 cm, em comparação aos resultados obtidos com o fornecimento da adubação mineral, principalmente para as doses acima de  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . A faixa ideal de pH para o desenvolvimento da maioria das plantas é de 6,50, para a cultura do milho esta faixa varia de 5,50 a 6,50 (DARTORA *et al.*, 2013), portanto, nas parcelas que receberam as maiores doses de vinhaça o pH do solo na profundidade de até 10 cm, nos três anos agrícolas, ficaram em valores que permitem a cultura atingir sua melhor curva de crescimento, pois nesta faixa de pH a disponibilidade de cátions como potássio, cálcio e magnésio aumentam, além de diminuir os teores de alumínio tóxico (HAGVALL *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2017).

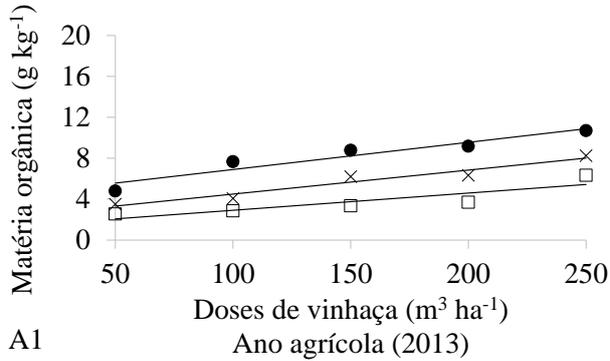
Quando observados os teores de alumínio do solo, em todas as profundidades estudadas, tanto para a adubação mineral quanto para a vinhaça, todos os teores obtidos foram inferiores a  $0,70 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas três profundidades estudadas e nos três anos agrícolas. Estes resultados obtidos podem ser justificados pelo fato dos efeitos nocivos da acidez serem minimizados pela correção da acidez do solo com uso de calcário, realizada antes de iniciar o cultivo e pela mineralização da matéria orgânica fornecida via vinhaça, o que elevou o pH do solo para valores próximos da neutralidade, precipitando o alumínio na forma de óxido de alumínio (GUNKEL *et al.*, 2007; HAGVALL *et al.*, 2015).

Analisando as doses de vinhaça aplicadas, observa-se na análise de regressão um efeito linear positivo no incremento dos teores de matéria orgânica e pH do solo, nas três profundidades estudadas, com valores mais expressivos para o ano agrícola de 2015, em comparação aos anos anteriores (2013 e 2014), como demonstrado na Figura 5 (A e B).

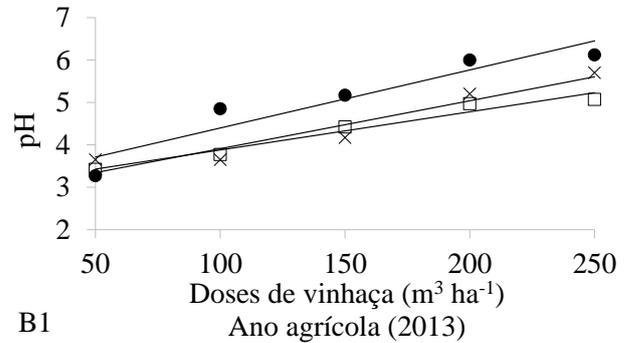
Alguns autores destacam que a vinhaça por si só já é fonte de nutrientes como o potássio, fósforo, cálcio e magnésio, devido a sua composição química. Além disso, a matéria orgânica fornecida ao solo via vinhaça possui a capacidade de complexar o alumínio trocável, o deixando menos disponível no solo. Ao complexar o alumínio a tendência do pH do solo é aumentar. Este aumento de pH do solo no presente estudo apresentou uma tendência linear, o que condiz com a elevação nos teores de matéria orgânica, sendo estes resultados próximos aos obtidos por Paulino

*et al.* (2011) e *Silva et al.* (2014a), aplicando a vinhaça em áreas agrícolas cultivadas com cana-de-açúcar.

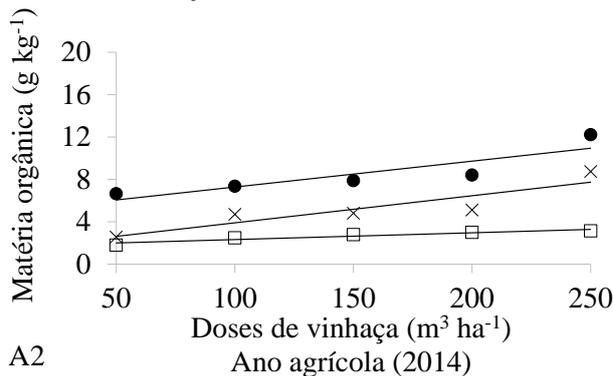
● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 4,7340 + 0,0246x$   $r^2 = 0,8939$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 2,1510 + 0,0235x$   $r^2 = 0,9434$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 1,2330 + 0,0168x$   $r^2 = 0,7799$



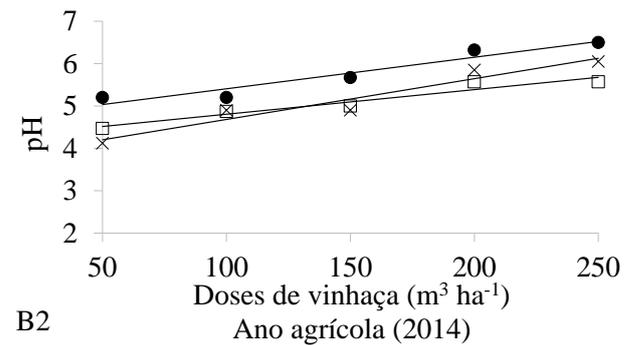
● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 3,0270 + 0,0137x$   $r^2 = 0,8912$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 2,7790 + 0,0113x$   $r^2 = 0,9172$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 2,9800 + 0,0090x$   $r^2 = 0,9611$



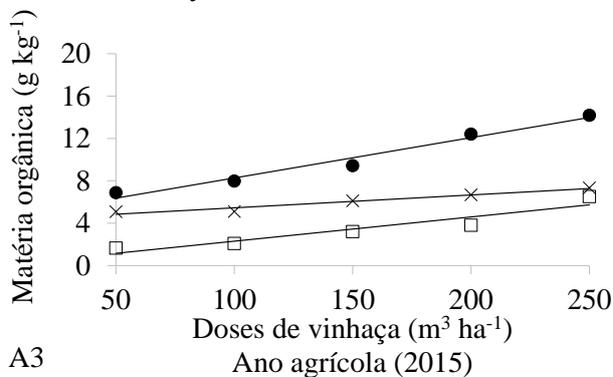
● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 4,8420 + 0,0244x$   $r^2 = 0,7844$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 1,3430 + 0,0256x$   $r^2 = 0,8191$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 1,6760 + 0,0064x$   $r^2 = 0,9004$



● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 4,6620 + 0,0074x$   $r^2 = 0,9257$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 3,7210 + 0,0096x$   $r^2 = 0,9311$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 4,2260 + 0,0058x$   $r^2 = 0,9329$



● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 4,4630 + 0,0381x$   $r^2 = 0,9718$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 4,2370 + 0,0121x$   $r^2 = 0,9522$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 0,0080 + 0,0229x$   $r^2 = 0,8933$



● (0 a 10 cm)  $\hat{y} = 5,1970 + 0,0059x$   $r^2 = 0,9835$   
 × (10 a 20 cm)  $\hat{y} = 3,9730 + 0,0109x$   $r^2 = 0,9662$   
 □ (20 a 40 cm)  $\hat{y} = 3,0270 + 0,0137x$   $r^2 = 0,8912$

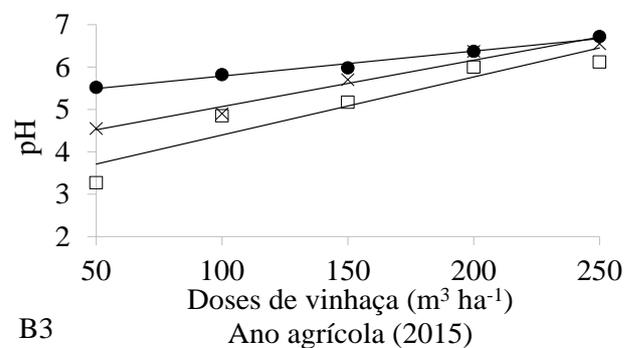


Figura 5. Teores de matéria orgânica (A1, 2 e 3) e pH (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Nota-se na Figura 5A, que aplicando uma dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça já foi possível incorporar na camada de até 10 cm, 5,96, 6,06 e  $6,36 \text{ g kg}^{-1}$  de matéria orgânica ao solo, nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente. Esta incorporação de matéria orgânica ao solo favorece diretamente os cultivos agrícolas, principalmente em solos de regiões tropicais que são naturalmente de baixa fertilidade. Alguns autores salientam que via de regra para as condições brasileiras os resíduos orgânicos favorecem o cultivo do milho e convém usá-los sempre que possível (LÁZARO *et al.*, 2013; ZIECH *et al.*, 2016).

Além disso, este aporte de matéria orgânica favorece a elevação do pH e a consequente alcalinização do solo (LOURENZI *et al.*, 2016), como demonstrado com o aumento linear nos valores de pH do solo nas parcelas onde foram obtidos os maiores teores de matéria orgânica.

De forma semelhante aos resultados obtidos no presente estudo, Silva *et al.* (2011) avaliando os valores de pH e o teor de matéria orgânica no solo após o uso agrícola de resíduos orgânicos, observaram um aumento linear nos valores de pH em um Latossolo Vermelho-Amarelo, no município de Pitimbu, PB. Tais resultados condizem com os obtidos no presente estudo, com aumento linear nos teores de matéria orgânica e pH do solo. Estes autores destacam ainda que a elevação do pH para valores próximos da neutralidade diminui a acidez potencial do solo em detrimento dos teores de alumínio trocável.

O uso agrícola da vinhaça também aumentou linearmente os teores de fósforo e potássio do solo nas três profundidades estudadas. Nota-se na Figura 6 (A e B), que para os teores de fósforo e potássio na profundidade de até 10 cm, aplicando uma dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , já foi possível obter no primeiro ano (2013), aproximadamente  $12,06$  e  $77,15 \text{ mg dm}^{-3}$  destes nutrientes, respectivamente, valores estes classificados como baixo para o fósforo e médio para o potássio, no tipo de solo do presente estudo (PREZOTTI *et al.*, 2007).

Estes resultados obtidos podem ser justificados pela baixa mobilidade do fósforo no solo, fazendo com que ocorra um acúmulo nas camadas superiores (BASSO *et al.*, 2005). Já a disponibilidade de potássio com o uso da vinhaça pode ser justificada pelo fato deste ser o elemento em maior concentração neste resíduo. A vinhaça utilizada no presente estudo possui uma concentração média de  $2,98 \text{ g L}^{-1}$  de potássio (Tabelas 4 e 5), o que possibilitou um aumento significativo nos teores do solo, principalmente na profundidade de até 10 cm.

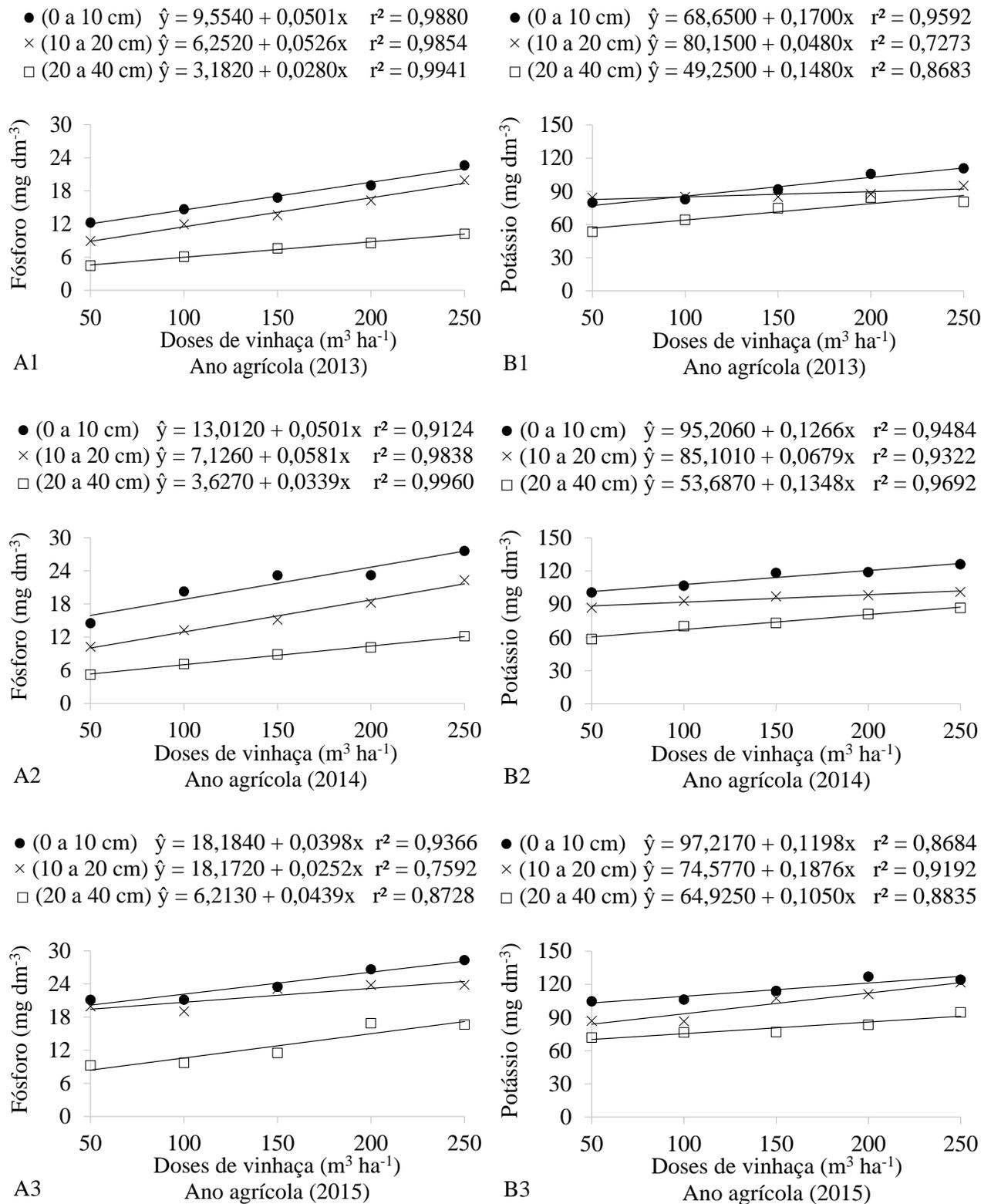


Figura 6. Teores de fósforo (A1, 2 e 3) e potássio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Com base nestes resultados obtidos, é possível inferir que a aplicação da vinhaça pode aumentar a disponibilidade de fósforo e potássio no solo, principalmente na camada de até 10

cm. Tais resultados também foram observados por outros pesquisadores, em diferentes condições experimentais, ao aplicarem a vinhaça ao solo em áreas agrícolas cultivadas com cana-de-açúcar (BARROS *et al.*, 2010; PAULINO *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2014a).

No presente estudo, os teores de cálcio e magnésio do solo também apresentaram um aumento linear em função da aplicação das doses de vinhaça, como demonstrado na Figura 7 (A e B). Além disso, o solo na área de estudo é um Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa, tendo como característica baixa fertilidade natural e lenta infiltração de água, devido à elevada coesão dos agregados, promovendo uma menor lixiviação destes cátions, o que contribui diretamente para o aumento da concentração no solo (EMBRAPA, 2013).

Estas características podem ter contribuído para que a concentração de cálcio e magnésio apresentasse um crescimento linear, independente da profundidade estudada, nos três anos agrícolas, com teores mais expressivos na camada superior do solo (0 a 10 cm). Estudos exploratórios do uso agrícola da vinhaça ao longo do tempo e suas alterações nos atributos químicos do solo demonstraram resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo (ZOLIN *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2014b).

Neste sentido, apesar da aplicação da vinhaça ter aumentado linearmente os teores de cálcio e magnésio do solo nas três profundidades estudadas, nota-se que na profundidade de até 10 cm, aplicando uma dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , já foi possível obter no primeiro ano (2013), 1,58 e  $0,62 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  destes nutrientes, respectivamente, valores estes classificados como médios para o cultivo do milho no tipo de solo do presente estudo (PREZOTTI *et al.*, 2007).

Segundo Malavolta (2008), em cultivos agrícolas os teores de cálcio e magnésio, quando em concentrações baixas no solo, podem inibir entre outras funções metabólicas, o desenvolvimento radicular das culturas, culminando em menor crescimento e produtividade. Contudo, como demonstrado no presente estudo, o uso agrícola da vinhaça mesmo na menor dose aplicada ( $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) possibilitou uma incorporação de cálcio e magnésio ao solo, satisfatória para o desenvolvimento das plantas de milho. Portanto estes resultados obtidos demonstram o potencial agrícola deste resíduo.

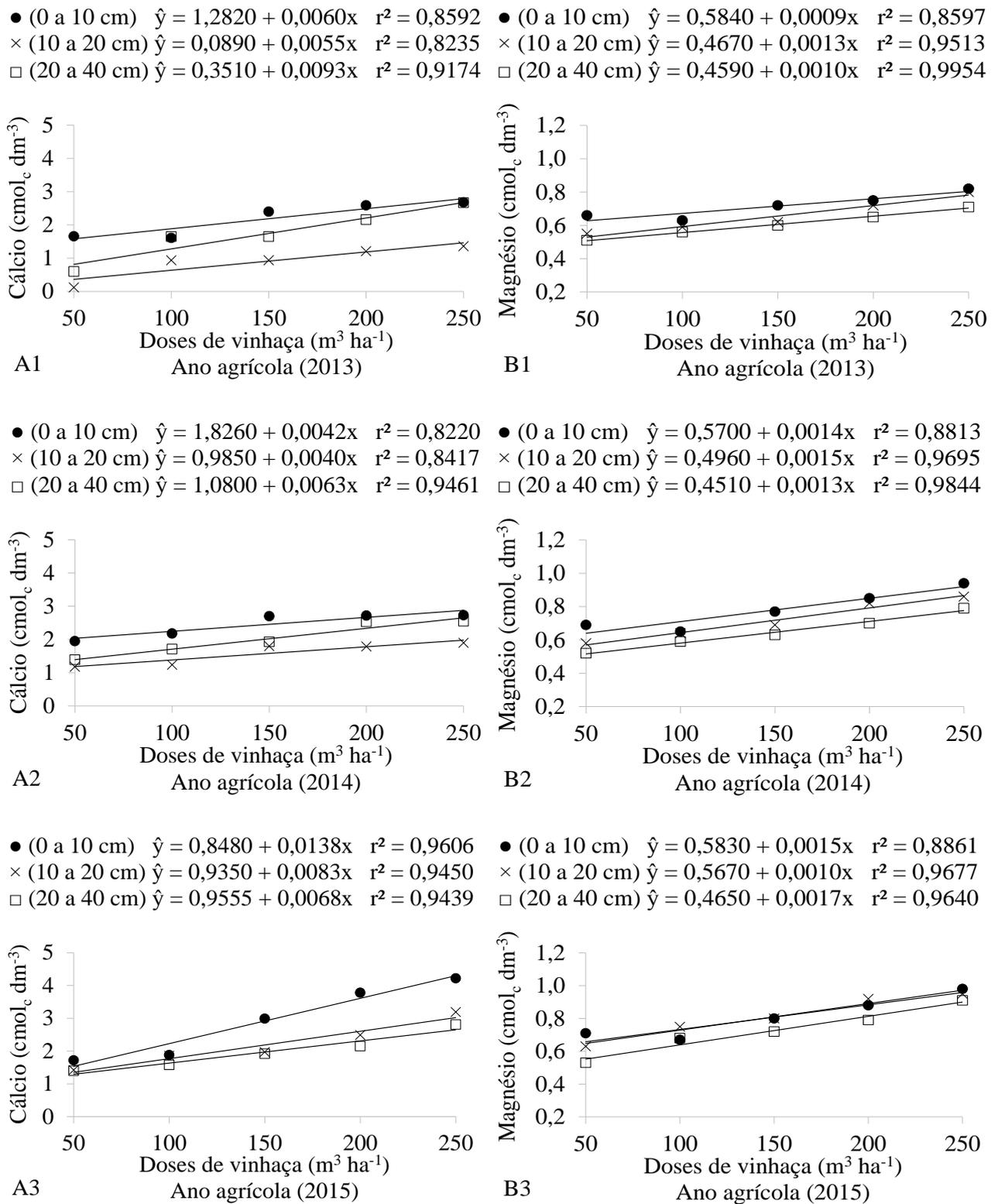


Figura 7. Teores de cálcio (A1, 2 e 3) e magnésio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Nota-se na Figura 7 (A e B), que a concentração de cálcio e magnésio no solo foi significativamente maior para as maiores doses de vinhaça aplicadas, nas três profundidades

estudadas. Estes resultados podem ser associados ao fato das maiores doses de vinhaça terem propiciado um ambiente mais alcalino, provocado pela elevação do pH, conseqüentemente, aumentando a disponibilidade destes cátions no solo. Além disso, o estabelecimento da matéria orgânica do solo via vinhaça permite uma maior concentração de substâncias ligantes, que possuem como característica a retenção destes cátions em detrimento dos teores de alumínio trocável do solo (TEJADA e GONZALEZ, 2006; GUNKEL *et al.*, 2007; HAGVALL *et al.*, 2015).

De maneira semelhante, para os teores de sódio, houve um crescimento linear em sua concentração no solo, nas três profundidades estudadas, em função da aplicação da vinhaça (Figura 8A). Apesar deste aumento, os teores obtidos de sódio ficaram dentro do limite estabelecido como aceitável para não comprometerem a estrutura do solo (AYERS e WESTCOT, 1999). Estes resultados confirmam os obtidos por Brito *et al.* (2005), que também observaram teores de sódio no solo em concentrações adequadas após a aplicação da vinhaça em diferentes concentrações.

Contudo, contrariam os resultados obtidos por Silva *et al.* (2012), que ao saturarem o solo com vinhaça obtiveram aumentos significativos nos teores de sódio no solo acima do limite aceitável, demonstrando que de fato a definição da dose de vinhaça a ser aplicada é fator limitante para o sucesso da atividade, pois teores de sódio no solo acima do limite adequado para a cultura, além de ocasionarem perdas nos índices de produtividade, podem comprometer a estrutura e a condutividade hidráulica do solo, por meio da dispersão da argila (AYERS e WESTCOT, 1999; ARRAES *et al.*, 2009).

Já para os teores de alumínio no solo, houve uma redução linear na concentração com o aumento nas doses de vinhaça aplicadas em todas as profundidades (Figura 8B). Esta redução nos valores encontrados de alumínio concordam com as variações de pH observadas na área, de forma que o pH ficou próximo da neutralidade, o que provavelmente provocou uma precipitação do alumínio, deste modo, uma maior porcentagem de cátions como o potássio, cálcio, magnésio e sódio ficaram retidos no complexo de troca do solo, justificando em parte o aumento mais expressivo na concentração destes cátions em detrimento dos teores de alumínio no solo (TEJADA *et al.*, 2009; BOLZANI *et al.*, 2012).

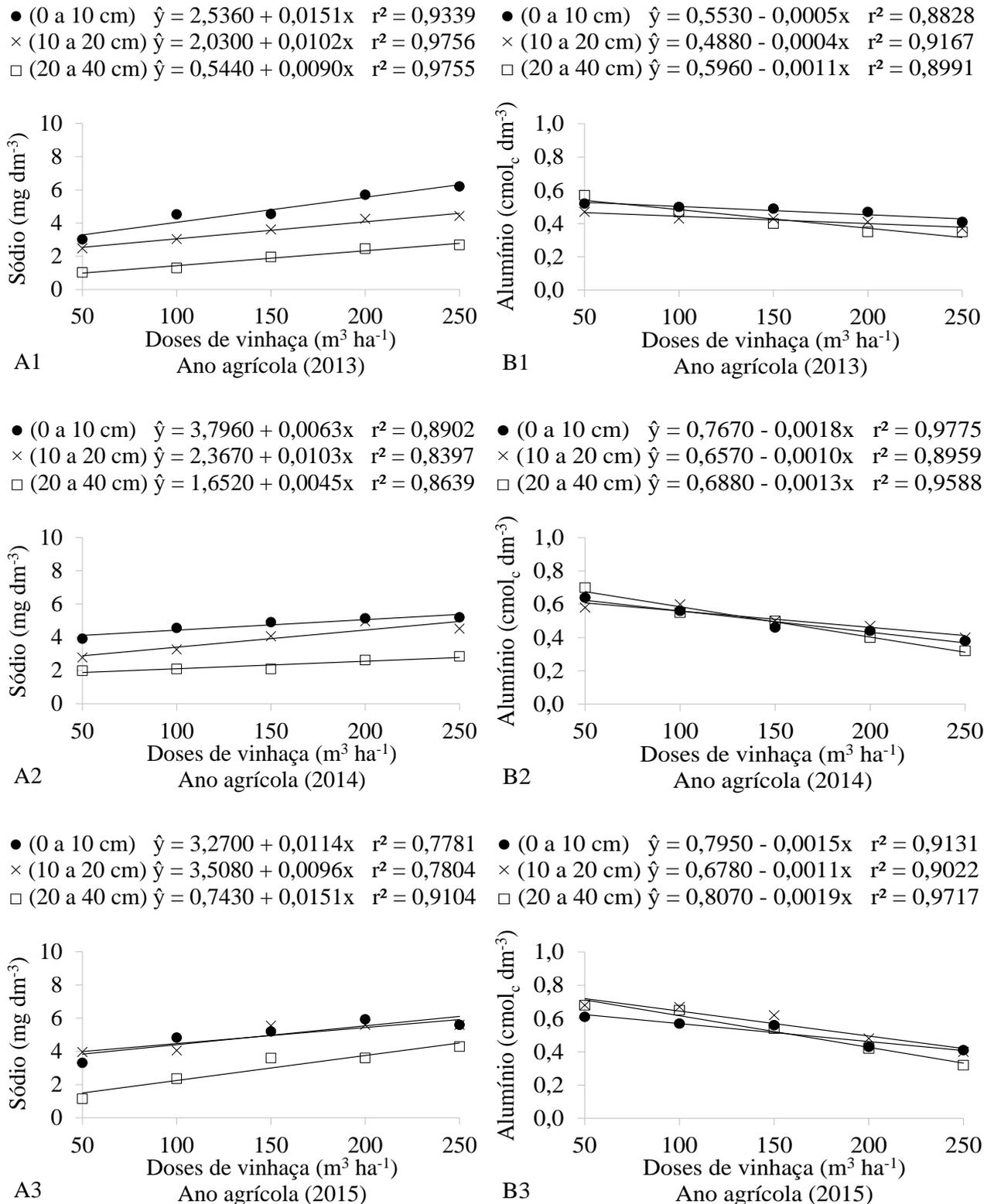


Figura 8. Teores de sódio (A1, 2 e 3) e alumínio (B1, 2 e 3) nas três profundidades estudadas em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

De maneira geral, a mineralização dos nutrientes, com exceção do potássio, contidos na composição química da vinhaça, associada ao aumento do pH para valores próximos da

neutralidade e a precipitação do alumínio na forma de óxido, contribuem de maneira positiva com a fertilidade do solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das culturas, o que torna a aplicação da vinhaça uma alternativa para melhorar a fertilidade do solo e contribuir com a produção agrícola, assim como demonstrado por outros pesquisadores ao aplicarem a vinhaça como fonte de adubação em cultivos agrícolas (BARBOSA *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2012; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2014a).

Neste sentido, o aumento na concentração de cátions no complexo de troca do solo no presente estudo, principalmente o potássio, cálcio e magnésio, podem ser justificados pela composição química da vinhaça que contém estes nutrientes e a mineralização da matéria orgânica fornecida via vinhaça, que devido a sua característica coloidal confere ao solo uma maior quantidade de cargas negativas, aumentando o seu potencial de retenção destes cátions (ZOLIN *et al.*, 2011; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013).

Deste modo, se utilizada com critérios técnicos e em doses adequadas à vinhaça torna-se um subproduto de interesse agrônômico, apresentando possibilidades reais de uso como fonte de matéria orgânica e nutriente ao solo. Logo, o uso agrícola da vinhaça possibilita um maior aporte de nutrientes ao solo, demonstrando que sua aplicação pode ser uma fonte alternativa para suprir a demanda nutricional de culturas com interesse agrícola. A fim de verificar tal informação, foram realizadas avaliações dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho.

#### 4.2 TEORES NUTRICIONAIS NO TECIDO FOLIAR DA CULTURA DO MILHO

Por meio dos resultados obtidos, após a análise de variância (Anexo D), verificou-se que a aplicação de vinhaça no cultivo do milho proporcionou alterações significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) nos teores de macro e micronutrientes no tecido foliar.

Observando os valores médios dos teores foliares de nutrientes apresentados na Tabela 10, nota-se que os teores foliares de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio, magnésio e boro, nas parcelas que ocorreram à aplicação de 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, não apresentaram diferença significativa em relação ao tratamento com a adubação mineral (NPK). Por sua vez, observa-se que para a dose de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, os teores foliares destes nutrientes foram inferiores, nos três anos agrícolas. Portanto, com exceção da dose correspondente a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, as demais doses aplicadas supriram a demanda nutricional da cultura, não apresentando diferença significativa dos resultados obtidos com a aplicação da adubação mineral.

Tabela 10. Valores médios dos teores nutricionais no tecido foliar da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas

Tratamentos	2013									
	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Zn
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
NPK	2,59 A	0,28 A	1,87 A	0,07 A	0,32 A	0,28 A	18,05 A	17,40 A	192,19 A	63,75 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	1,81 B	0,18 B	0,79 B	0,08 B	0,18 B	0,13 B	8,74 B	19,34 A	240,07 A	86,49 A
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,70 A	0,26 A	1,50 A	0,14 A	0,25 A	0,19 A	14,79 A	18,04 A	220,75 A	83,31 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,72 A	0,26 A	1,59 A	0,15 A	0,33 A	0,28 A	16,48 A	18,00 A	194,08 A	69,54 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,79 A	0,27 A	1,97 A	0,15 A	0,35 A	0,31 A	18,07 A	17,38 A	175,23 A	52,03 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,03 A	0,28 A	2,27 A	0,16 A	0,40 A	0,37 A	20,63 A	17,00 A	126,35 B	41,99 B
CV (%)	6,16	7,56	11,36	6,99	11,51	6,39	9,34	9,05	8,42	5,64
Tratamentos	2014									
	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Zn
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
NPK	3,01 A	0,29 A	1,96 A	0,12 A	0,32 A	0,35 A	18,17 A	17,57 A	199,38 A	64,88 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	1,91 B	0,18 B	0,99 B	0,09 B	0,19 B	0,19 B	9,42 B	18,97 A	227,09 A	83,50 A
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,33 A	0,26 A	1,70 A	0,11 A	0,26 A	0,41 A	14,00 A	18,67 A	208,04 A	81,20 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,50 A	0,29 A	1,95 A	0,12 A	0,37 A	0,47 A	14,61 A	18,33 A	176,10 A	68,43 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,51 A	0,29 A	2,18 A	0,12 A	0,38 A	0,56 B	18,49 A	17,97 A	155,47 B	42,57 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,62 A	0,32 A	2,47 A	0,13 A	0,40 A	0,60 B	21,70 A	16,37 A	140,19 B	30,55 B
CV (%)	6,79	5,71	5,97	10,35	11,16	3,74	9,94	7,13	5,54	6,21
Tratamentos	2015									
	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Zn
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----					-----mg kg <sup>-1</sup> -----				
NPK	3,00 A	0,29 A	2,30 A	0,19 A	0,40 A	0,42 A	16,16 A	17,69 A	197,51 A	65,75 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,55 B	0,19 B	1,40 B	0,09 B	0,24 B	0,40 A	9,80 B	17,82 A	201,08 A	84,38 A
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	2,94 A	0,28 A	2,03 A	0,19 A	0,41 A	0,61 B	14,56 A	16,49 A	201,00 A	70,89 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,50 A	0,32 A	2,18 A	0,20 A	0,42 A	0,77 B	16,73 A	16,10 A	156,87 B	62,26 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,50 A	0,32 A	2,24 A	0,30 B	0,42 A	0,81 B	18,49 A	15,09 A	136,80 B	59,79 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	3,54 A	0,33 A	2,50 A	0,30 B	0,57 A	0,84 B	22,48 B	13,43 A	121,01 B	40,57 B
CV (%)	3,82	3,52	3,58	7,63	8,34	2,58	7,96	3,48	5,06	5,08
Valores de referência*	2,70 a	0,20 a	1,70 a	0,10 a	0,25 a	0,15 a	10,00 a	6,00 a	30,00 a	20,00 a
	3,50	0,40	3,50	0,30	0,40	0,50	25,00	20,00	250,00	70,00

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. CV (%): Coeficiente de variação.\*Teores foliares de macro e micronutrientes considerados adequados para o desenvolvimento da cultura do milho (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007).

Esta absorção de macro e micronutrientes pela cultura nas parcelas que ocorreram à aplicação das doses de vinhaça acima de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , nos três anos agrícolas, pode ser associada ao fato da vinhaça ter possibilitado um maior aporte de nutrientes ao solo, assim como demonstrado pela avaliação dos atributos químicos do solo apresentadas nas Tabelas 7, 8 e 9. Logo, com o maior aporte de nutrientes ao solo, a tendência da cultura é absorver e translocar para a parte aérea uma maior quantidade destes elementos, conseqüentemente aumentando o seu teor foliar (MALAVOLTA, 2008; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Desta forma, baseando-se nos resultados apresentados na Tabela 10, pode-se considerar a vinhaça como uma fonte alternativa para o fornecimento de nutrientes a cultura do milho, devido a sua composição química que supriu a demanda nutricional da cultura. Além disso, a matéria orgânica fornecida ao solo via vinhaça, possui a capacidade de complexar o alumínio trocável o qual eleva o pH do solo, logo, a capacidade de troca catiônica do solo é naturalmente aumentada e os cátions trocáveis também ficam em maior concentração no complexo de troca do solo (HAGVALL *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2017), o que pode justificar em parte o maior acúmulo de alguns cátions como o cálcio e magnésio no tecido foliar da cultura do milho, nas parcelas que receberam as doses de 200 e  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, em comparação aquelas que receberam a adubação mineral ou demais doses ( $50, 100$  e  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), principalmente no ano agrícola de 2015.

Os teores foliares de nitrogênio e enxofre quando aplicada a vinhaça, com exceção da dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , apresentaram valores dentro do limite aceitável para a cultura, enquanto a adubação mineral condicionou teores deste elemento abaixo do mínimo necessário, no ano agrícola de 2013, o que pode contribuir para uma redução na produção da cultura (FURLANI, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2013). Contudo, nos anos agrícolas de 2014 e 2015, com exceção da dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , a absorção de ambos os nutrientes foram adequadas nas parcelas que receberam a vinhaça, assim como nas parcelas que receberam a adubação mineral.

De maneira semelhante, para os teores foliares de fósforo, com exceção da dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , com a aplicação da vinhaça ou a adubação mineral o teor foliar deste nutriente ficou dentro do limite considerado adequado ( $0,20$  a  $0,40 \text{ dag kg}^{-1}$ ), nos três anos agrícolas. Desta forma, o fornecimento deste nutriente para a cultura do milho via vinhaça apresenta potencial, pois não houve diferenças no teor foliar de fósforo com a aplicação da adubação mineral em relação à vinhaça nas doses acima de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

Assim como no presente estudo, Santos *et al.* (2012) aplicando a vinhaça em uma área agrícola cultivada com cana-de-açúcar na região Sul do Paraná, constataram que a absorção de nutrientes pela cultura foi mais expressiva aplicando doses acima de  $180 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, com

maior teor foliar de macro e micronutrientes, quando comparado aos teores nutricionais no tecido foliar da cultura que recebeu a adubação mineral ou doses inferiores de vinhaça.

Em relação aos teores foliares de potássio, a vinhaça utilizada no presente estudo possui uma concentração média de  $2,98 \text{ g L}^{-1}$  de potássio (Tabelas 4 e 5), desta forma os teores de potássio no solo das parcelas que receberam a vinhaça foram significativamente superiores às parcelas que receberam a adubação mineral (Tabelas 7, 8 e 9), refletindo diretamente no teor foliar de potássio nas plantas de milho, de forma que nas parcelas que receberam  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, o teor foliar de potássio foi 21,39, 26,02 e 8,69% acima do obtido na parcela que recebeu a adubação mineral, nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente. Contudo, estes teores estão dentro do limite estabelecido como adequado para a cultura (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007).

Estes resultados obtidos podem ser associados em parte ao fato da vinhaça também conter em sua composição química outros cátions, como o cálcio, magnésio e sódio, o que pode ter ocasionado uma maior disponibilidade destes cátions no complexo de troca do solo, conseqüentemente inibindo uma absorção mais expressiva do potássio, pois este não era o único elemento disponível a cultura (MEDEIROS *et al.*, 2008a; BONINI *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2014a).

Alguns autores destacam que a aplicação de resíduos orgânicos ao solo condiciona um ambiente mais estável devido ao aporte de matéria orgânica, o que permite uma maior concentração de substâncias ligantes, que possuem como característica a retenção destes cátions (TEJADA e GONZALEZ, 2006; GUNKEL *et al.*, 2007; HAGVALL *et al.*, 2015).

Considerando as doses de vinhaça aplicadas, observa-se na análise de regressão um efeito linear positivo no incremento dos teores foliares de nitrogênio, potássio, fosforo e enxofre, nos três anos agrícolas, com valores mais expressivos para o ano agrícola de 2015, em relação aos anos anteriores (2013 e 2014), como demonstrados na Figura 9 (A e B).

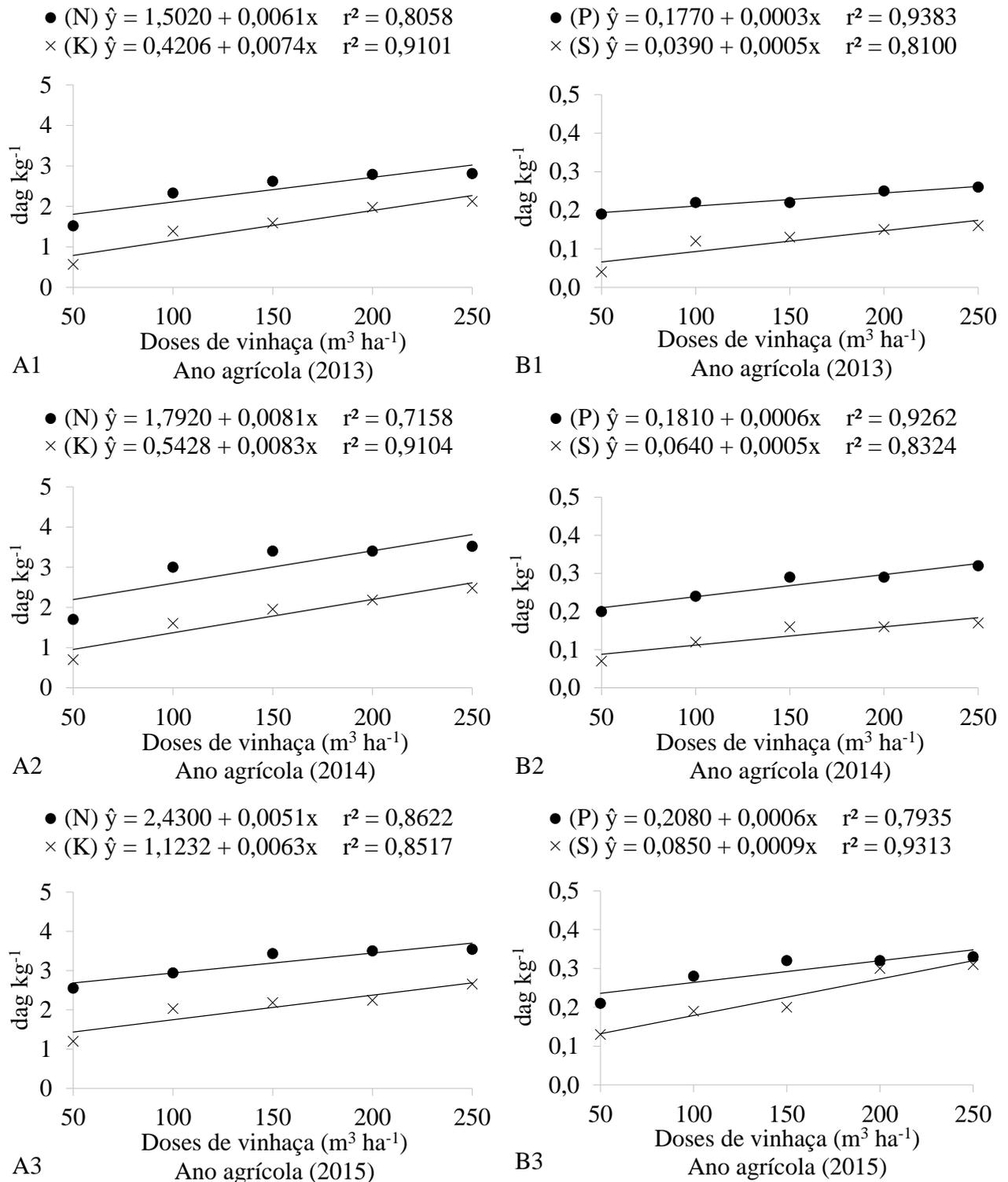


Figura 9. Teores de nitrogênio e potássio (A1, 2 e 3) e fósforo e enxofre (B1, 2 e 3) no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Nota-se que os teores foliares de nitrogênio e potássio nas plantas de milho tiveram diferentes concentrações de acordo com a dose de vinhaça aplicada, nos três anos agrícolas, com teores obtidos já no primeiro ano de 1,81 e 0,79  $dag kg^{-1}$  para o nitrogênio e potássio,

respectivamente, na dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Ainda no primeiro ano (2013), o teor foliar de ambos os nutrientes foi de 3,03 e  $2,27 \text{ dag kg}^{-1}$ , respectivamente, na dose de  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ .

Com estes resultados obtidos, observa-se que o aumento no teor foliar do nitrogênio e potássio na maior dose aplicada ( $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) foi de 67,40 e 187,34%, respectivamente, em comparação a menor dose aplicada ( $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ), demonstrando que a dose de vinhaça influencia diretamente na absorção e translocação destes nutrientes para a parte aérea das plantas de milho.

De forma semelhante, no experimento implantado por Basso *et al.* (2013) no cultivo do milho com aplicação da vinhaça, em comparação com o cultivo feito por meio de um manejo convencional, foram observados incrementos nas concentrações de potássio e nitrogênio no tecido foliar da cultura com o aumento das doses de vinhaça aplicadas, assim como observado no presente estudo.

Devido ao acúmulo de nutrientes no solo advindos da aplicação da vinhaça, também houve um aumento linear nos teores de cálcio e magnésio no tecido foliar da cultura do milho, nos três anos agrícolas (Figura 10). Contudo, nota-se que aplicando uma dose de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  já foi possível obter no primeiro ano teores foliares de aproximadamente  $0,25$  e  $0,19 \text{ dag kg}^{-1}$  de cálcio e magnésio, respectivamente, valores estes considerados satisfatórios para que a cultura do milho se desenvolva e produza adequadamente (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007).

Entretanto, na dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , obteve-se teores foliares de  $0,18$  e  $0,13 \text{ dag kg}^{-1}$ , para o cálcio e magnésio, respectivamente, teores estes considerados abaixo do recomendado para a cultura, o que pode comprometer o seu desenvolvimento e a produção final, pois neste caso funções metabólicas, enzimáticas e fotossintéticas são afetadas (FURLANI, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Estes resultados obtidos demonstram que a definição da dose de vinhaça a ser aplicada deve ser priorizada para auxiliar no uso agrícola de efluentes líquidos, sendo a sua importância salientada por diversos pesquisadores, trabalhando com o objetivo de estudar e definir as melhores doses de efluentes a serem aplicadas em cultivos agrícolas (MEDEIROS *et al.*, 2008b; LIMA *et al.*, 2013; SOUZA e GUIMARÃES, 2013; LIRA *et al.*, 2015).

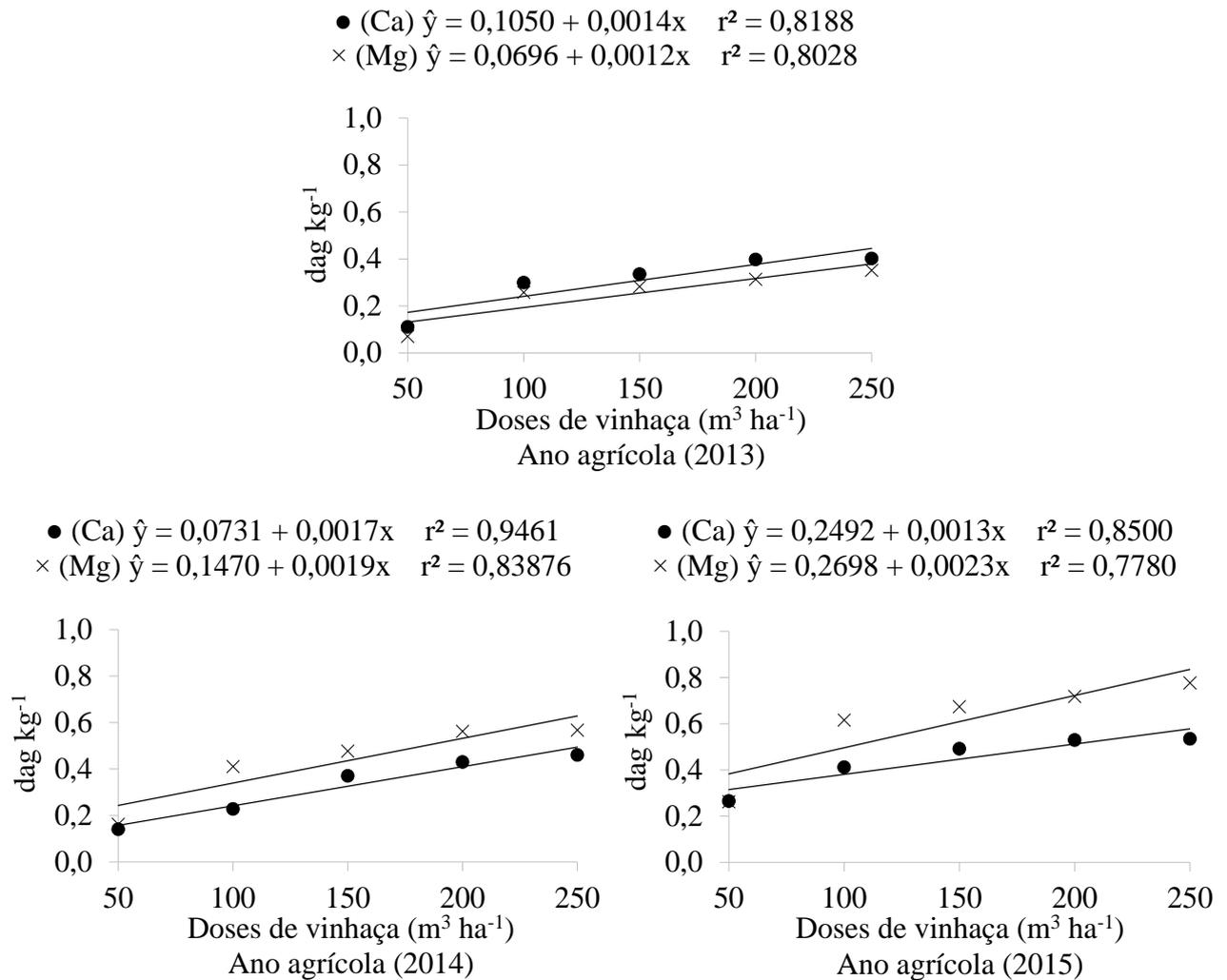


Figura 10. Teores de cálcio e magnésio no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Como demonstrado na Figura 10, os teores de cálcio e magnésio no tecido foliar das plantas de milho tiveram um crescimento linear nos três anos agrícolas, entretanto, nota-se que nas maiores doses de vinhaça aplicadas, principalmente no ano agrícola de 2015, estes teores foliares ficaram acima do limite adequado, com concentrações de 0,57 e 0,84 dag kg<sup>-1</sup> de cálcio e magnésio, respectivamente. Do mesmo modo, na menor dose de vinhaça aplicada (50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), os teores destes cátions ficaram abaixo do adequado, no ano agrícola de 2013. Contudo, neste mesmo ano, nas doses de 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, os teores obtidos de ambos os cátions ficaram em teores adequados para as plantas de milho (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007).

Estes resultados obtidos podem ser associados em parte à composição química da vinhaça que contém estes elementos, que confere ao solo uma maior quantidade de cargas negativas, o que aumenta consideravelmente o seu potencial de retenção destes cátions (ZOLIN *et al.*, 2011).

Neste caso, ocorre uma maior disponibilidade destes nutrientes no solo, ocasionando um aumento na absorção e posterior translocação para o tecido foliar da parte aérea da cultura (MALAVOLTA, 2008; TAIZ e ZEIGER, 2013), o que pode ter culminado para uma absorção acima do limite considerado aceitável nas parcelas que receberam 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, principalmente no ano agrícola de 2015.

Com exceção do zinco, os micronutrientes boro, cobre e ferro no tecido foliar das plantas de milho ficaram dentro do limite máximo definido como aceitável para a cultura, independente da dose de vinhaça aplicada, nos três anos agrícolas. Contudo, o teor foliar de boro na dose correspondente a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça ficou abaixo do adequado, com teores de 8,74, 9,42 e 9,80 mg kg<sup>-1</sup>, para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, o que representa um déficit médio de 6,80% de boro no tecido foliar da cultura, nos três anos agrícolas. Já para as demais doses aplicadas, os teores de boro foram adequados, com um aumento linear, enquanto os demais micronutrientes diminuíram de maneira linear com o aumento das doses de vinhaça aplicadas (Figura 11 A e B).

Para os teores de zinco, nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, nas doses de vinhaça correspondentes a 50 e 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, houve um acúmulo foliar acima de 70 mg kg<sup>-1</sup>, o que pode comprometer o desenvolvimento da cultura (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007). Contudo, nas demais doses aplicadas os teores obtidos foram adequados à cultura do milho, nos três anos agrícolas. Estes resultados obtidos podem ser associados em parte às variações na composição química da vinhaça entre os anos de estudo, que contém estes elementos em quantidades distintas (Tabelas 4 e 5).

Além disso, a disponibilidade dos micronutrientes cobre, ferro e zinco crescem em solos com pH mais baixo (GARCIA-MINA *et al.*, 2004). Portanto, no presente estudo, com o uso agrícola da vinhaça houve uma situação inversa, devido à elevação do pH do solo, o que explica em parte as reduções observadas nos teores foliares destes micronutrientes nas plantas de milho. Logo, a elevação do pH do solo, associada ao aumento do teor de matéria orgânica, resultou no aumento das cargas negativas, e conseqüentemente, na capacidade de adsorção destes micronutrientes catiônicos, afetando diretamente a disponibilidade para as plantas de milho.

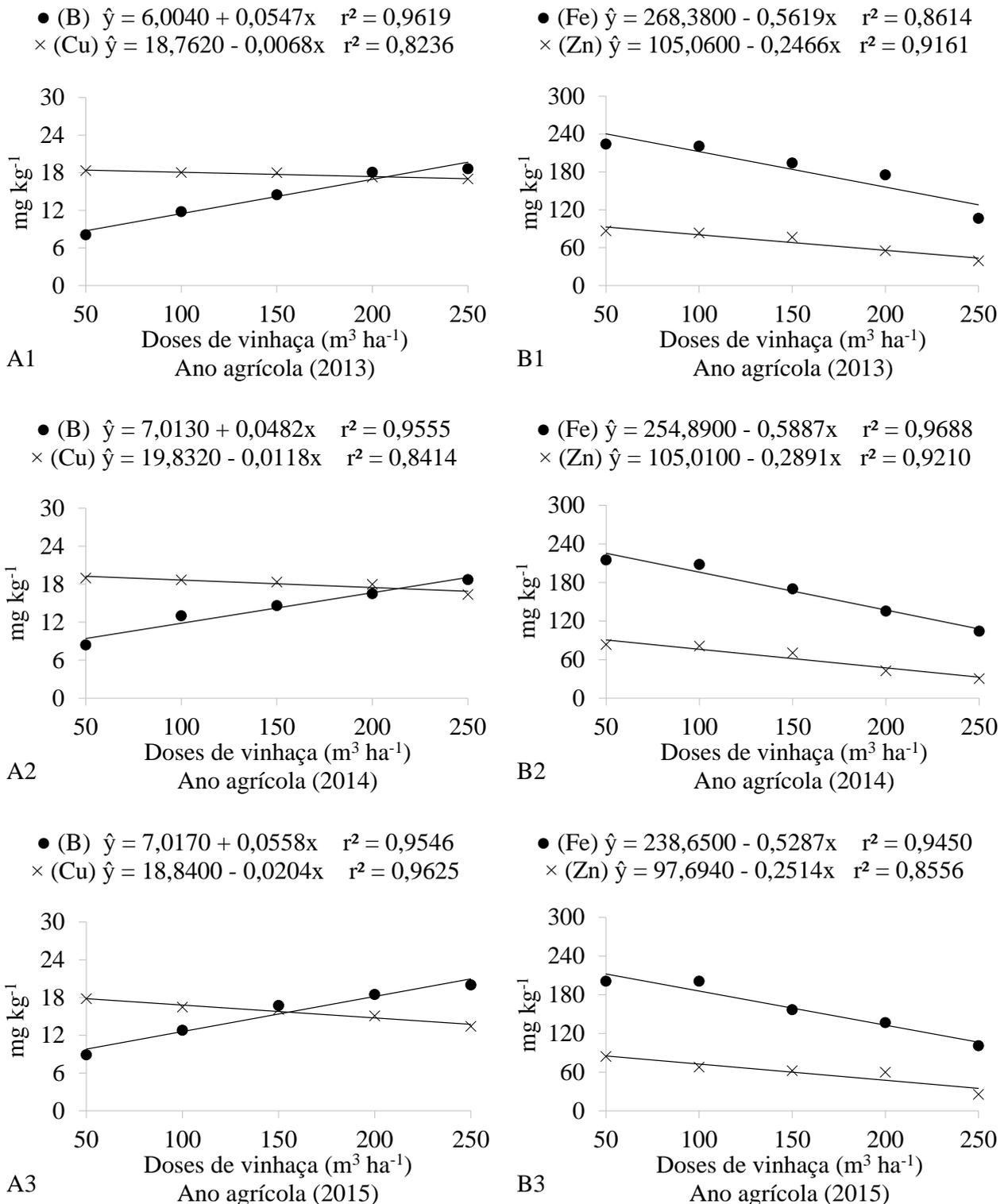


Figura 11. Teores de boro e cobre (A1, 2 e 3) e ferro e zinco (B1, 2 e 3) no tecido foliar da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

De forma semelhante, no experimento implantado por Santos *et al.* (2012) no cultivo da cana-de-açúcar com a aplicação da vinhaça, em comparação com o cultivo feito por meio de um manejo convencional, foram observados incrementos nas concentrações de micronutrientes do

solo, com a aplicação de diferentes doses de vinhaça, favorecendo uma maior absorção e translocação destes elementos para o tecido foliar da cultura, assim como, os resultados obtidos no presente estudo.

Deste modo, se utilizada com critérios técnicos e em doses adequadas à vinhaça torna-se um subproduto de interesse agrônômico, apresentando possibilidades reais de uso em cultivos agrícolas, suprimindo a demanda nutricional da cultura do milho, como demonstrando nos resultados obtidos neste estudo, o que pode auxiliar para a obtenção de uma maior produtividade. Com o intuito de verificar tal informação, foram realizadas avaliações na produção da cultura do milho em três safras.

### 4.3 PRODUÇÃO DA CULTURA DO MILHO

#### 4.3.1 Forragem

Por meio dos resultados obtidos, após a análise de variância (Anexo E), verificou-se que a aplicação de vinhaça no cultivo do milho proporcionou alterações significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) nas variáveis massa fresca e seca da parte aérea e produção de forragem da cultura.

Observando os valores médios destas variáveis nos três anos agrícolas, apresentados na Tabela 11, nota-se que a produção de massa fresca, seca e forragem, com a aplicação da vinhaça foi inferior à produção obtida com o fornecimento da adubação mineral, nas doses correspondentes a 50, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, nos três anos agrícolas. No entanto, se observa que não ocorreram diferenças significativas para estas variáveis nas doses de 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça em relação à adubação mineral, nos três anos agrícolas.

Contudo, foi possível obter uma produção em torno de 30% de massa seca em relação à massa fresca, tanto para a adubação mineral quanto para a vinhaça, independente da dose aplicada. Esta proporção na produção de massa seca em relação à produção de massa fresca (que corresponde à produção de forragem), obtida no presente estudo, é considerada adequada e foi alcançada por outros pesquisadores, utilizando tanto a adubação mineral quanto a adubação orgânica para a produção de forragem de diferentes genótipos de milho (NEUMANN *et al.*, 2005; LANGE *et al.*, 2013; SOUZA e GUIMARÃES, 2013).

Tabela 11. Valores médios da produção de massa fresca (MF) e massa seca (MS) da parte aérea e produção de forragem (PF) por hectare da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas

Tratamentos	2013		
	MF	MS	PF
	-----gramas-----		-----t ha <sup>-1</sup> -----
NPK	898,50 A	282,00 A	49,91 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	619,50 B	189,75 B	34,41 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	992,25 A	302,75 A	55,12 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	816,50 A	250,50 A	45,36 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	640,00 B	215,50 B	35,55 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	513,50 B	171,50 B	28,52 B
CV (%)	12,90	8,90	8,90
Tratamentos	2014		
	MF	MS	PF
	-----gramas-----		-----t ha <sup>-1</sup> -----
NPK	992,75 A	331,00 A	55,15 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	554,50 B	160,00 B	30,80 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	1.019,00 A	295,50 A	56,61 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	823,75 A	276,25 A	45,76 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	605,50 B	213,00 B	33,63 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	533,75 B	193,25 B	29,65 B
CV (%)	8,88	4,87	9,87
Tratamentos	2015		
	MF	MS	PF
	-----gramas-----		-----t ha <sup>-1</sup> -----
NPK	947,00 A	241,75 A	52,61 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	698,25 B	191,75 B	38,79 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	943,25 A	276,50 A	52,40 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	842,75 A	270,00 A	46,81 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	696,25 B	229,00 A	38,68 B
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	529,50 B	191,00 B	29,41 B
CV (%)	9,16	5,12	7,23

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. CV (%): Coeficiente de variação.

OBS: A produção de forragem foi obtida multiplicando-se a produção de massa fresca pelo estande final, que foi de 55.555 plantas por hectare.

Apesar de uma menor produção com a aplicação da dose de 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça em relação à produção obtida com a adubação mineral, ainda assim, na menor dose de vinhaça aplicada já foi possível obter uma produção média em torno de 35 t ha<sup>-1</sup> de forragem, nos três anos agrícolas, sendo esta uma produção similar à obtida por outros pesquisadores ao aplicarem adubação orgânica e mineral para a produção de forragem de diferentes genótipos de milho (OLIVEIRA *et al.*, 2003; VIEIRA *et al.*, 2015). Estes resultados obtidos demonstram que a vinhaça é um efluente com potencial agrônômico, permitindo nos três anos agrícolas uma

produção similar a obtida com a adubação mineral, nas doses correspondentes a 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça.

Contudo, apesar de uma produção inferior nas doses de 50, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, o uso agrícola de efluentes possuem algumas vantagens, como a não dependência do produtor de grande quantidade de insumos externos, diminuição no custo de produção e destinação adequada de resíduos com potencial poluidor, portanto, mesmo com uma produção em torno de 35% abaixo da obtida com a adubação mineral nestas doses, há de se levar em consideração que o uso agrícola de efluentes apresenta significativos benefícios sociais, econômicos e ambientais (BEVILACQUA e KOPSCHITZ, 2009; LIMA *et al.*, 2012; NAIR e TAHERZADEH, 2016).

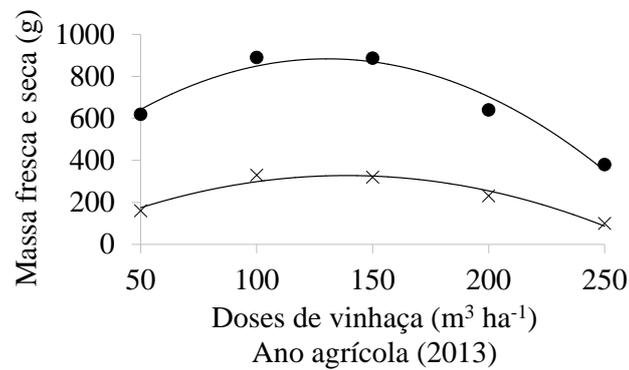
De forma semelhante, no experimento implantado por Santos *et al.* (2012), ao estudarem a viabilidade de fontes alternativas de adubação para o cultivo da cana-de-açúcar, foi constatado que a produção com a aplicação da vinhaça não apresentou diferença significativa para a obtida com a adubação mineral, assim como os resultados obtidos no presente estudo, para as doses correspondentes a 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Tais resultados indicam que o uso de resíduos orgânicos, em especial a vinhaça, pode ser uma alternativa viável para auxiliar na produção agrícola.

Neste sentido, considerando as doses de vinhaça aplicadas, observa-se um incremento na produção até a dose em torno de 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e uma estagnação até 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, nos três anos agrícolas (Tabela 11). Contudo, a partir desta dose é nítido pela análise de regressão que houve uma queda na curva de produção, ou seja, é necessário definir a dose que auxilie na obtenção de um melhor desenvolvimento da cultura. Desta forma, ao derivar a curva de produção, observa-se que no ano agrícola de 2013 a dose de vinhaça adequada para se obter uma maior produção de massa fresca e seca da parte aérea foi de 130,28 e 138,44 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> respectivamente, enquanto no ano de 2014 e 2015 foi de 139,08 e 128,04 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para a massa fresca e de 141,48 e 136,81 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para a massa seca, respectivamente (Figura 12).

Apesar das variáveis analisadas em cada ano agrícola terem sido influenciadas significativamente pela aplicação das diferentes doses de vinhaça, no ano agrícola de 2015 a produção foi mais expressiva quando comparada aos anos anteriores. Estes resultados obtidos são considerados comuns em cultivos com fornecimento de adubação orgânica, onde o aporte de nutrientes e matéria orgânica entre os cultivos subsequentes ocasionam uma maior mineralização e consequente disponibilidade de nutrientes ao longo dos anos, favorecendo o desenvolvimento das culturas (SPADOTTO e GOMES, 2014; COSTA *et al.*, 2015).

$$\bullet \text{ (MF) } \hat{y} = 249,9000 + 9,7191x - 0,0373x^2 \quad R^2 = 0,9596$$

$$\times \text{ (MS) } \hat{y} = 46,6000 + 5,3991x - 0,0195x^2 \quad R^2 = 0,9508$$



$$\bullet \text{ (MF) } \hat{y} = 78,9000 + 12,1000x - 0,0435x^2 \quad R^2 = 0,9806$$

$$\times \text{ (MS) } \hat{y} = 23,4000 + 3,5369x - 0,0125x^2 \quad R^2 = 0,9528$$

$$\bullet \text{ (MF) } \hat{y} = 393,6000 + 8,0920x - 0,0316x^2 \quad R^2 = 0,9953$$

$$\times \text{ (MS) } \hat{y} = 42,6000 + 3,4749x - 0,0127x^2 \quad R^2 = 0,8622$$

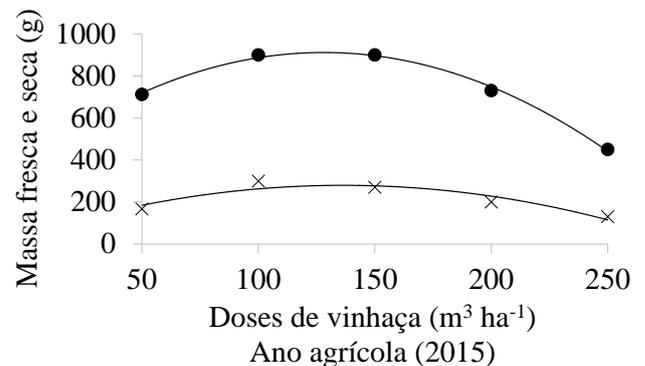
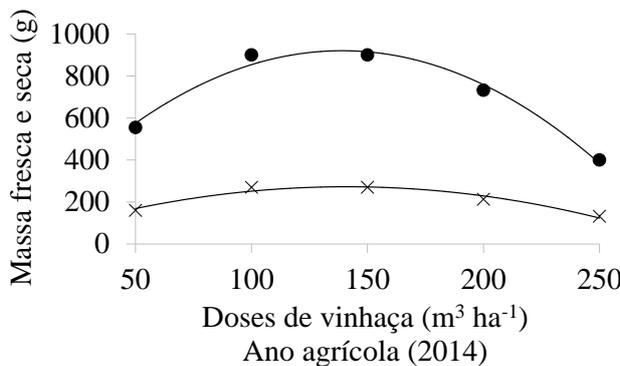


Figura 12. Massa fresca (MF) e massa seca (MS) da parte aérea da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

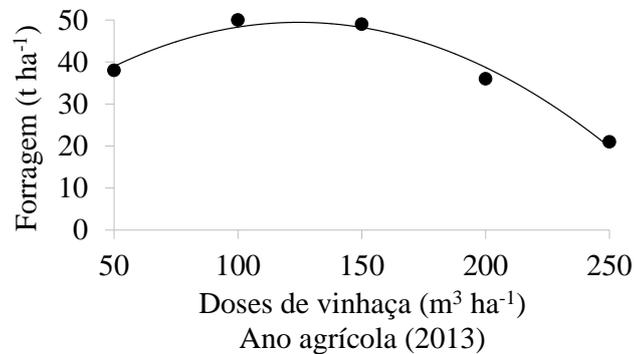
Pode-se dizer que estes resultados estão relacionados ao incremento de nutrientes ao solo advindos da aplicação da vinhaça (Tabelas 7, 8 e 9), que condiciona um ambiente mais estável para o desenvolvimento radicular da cultura, possibilitando uma maior oferta de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, refletindo diretamente na produção (PASUQUIN *et al.*, 2014).

Em um estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo, comparando áreas com aplicação anual de vinhaça a uma área sem aplicação, foi constatado por Paulino *et al.* (2011) que o fornecimento de vinhaça aumentou a disponibilidade de nutrientes e possibilitou um acréscimo no desenvolvimento da cana-de-açúcar ao longo dos anos. O mesmo foi observado para a cultura do milho no presente estudo. Todavia, há de se levar em conta que o fornecimento de doses acima de aproximadamente 140 m³ ha⁻¹ provocou um déficit no desenvolvimento

vegetativo, logo as doses aplicadas devem respeitar as diretrizes técnicas fundamentadas nas exigências nutricionais da cultura instalada.

Observa-se que as doses de vinhaça que auxiliaram para uma maior produção de massa fresca foram as que possibilitaram uma maior produção de forragem por hectare (Figura 13), ou seja, de fato existe uma relação direta entre estas variáveis, como mencionado por Souza e Guimarães (2013), ao estudarem a produção de forragem de milho em diferentes sistemas de cultivo.

$$\bullet \text{ (PF) } \hat{y} = 20,2000 + 0,4697x - 0,0019x^2 \quad R^2 = 0,9761$$



$$\bullet \text{ (PF) } \hat{y} = 18,1200 + 0,4803x - 0,0018x^2 \quad R^2 = 0,9936$$

$$\bullet \text{ (PF) } \hat{y} = 21,8460 + 0,3923x - 0,0015x^2 \quad R^2 = 0,9711$$

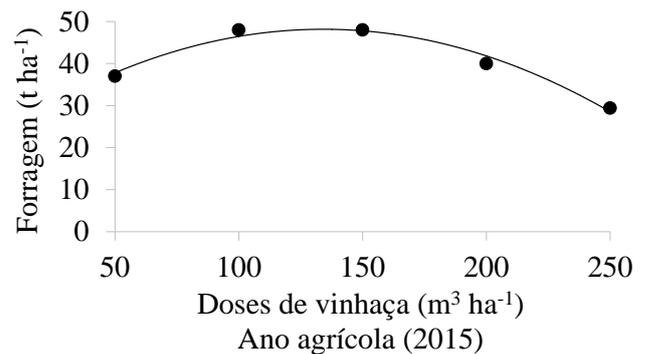
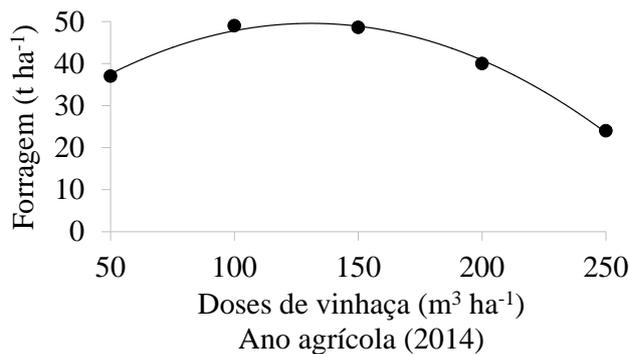


Figura 13. Produção de forragem por hectare da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Em relação à produção de forragem a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária unidade Milho e Sorgo considera uma produção em torno de 50 t ha⁻¹ satisfatória para a densidade utilizada no presente estudo, que foi de 55.555 plantas por hectare (CRUZ *et al.*, 2012).

Nos três anos agrícolas, na dose de vinhaça correspondente a  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , a produção de forragem estimada foi de 55,12, 56,61 e  $52,40 \text{ t ha}^{-1}$  para 2013, 2014 e 2015 respectivamente. Todavia, há de se levar em conta que para as demais doses de vinhaça aplicadas houve uma produção inferior à obtida com a dose de  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , com produtividade abaixo da expectativa, apesar da dose de vinhaça equivalente a  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  ter propiciado uma produtividade de forragem próxima à recomendação da Embrapa, sendo acima de  $45 \text{ t ha}^{-1}$  nos três anos agrícolas (Tabela 11). Contudo, ao derivar a curva de produção de forragem a maior produtividade corresponde às doses de 123,61, 133,42 e  $130,77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente.

Estes resultados obtidos indicam a necessidade de se estudar o manejo da adubação orgânica em cultivos agrícolas, para conciliar o uso mais eficiente destes resíduos, propiciando melhorias na fertilidade do solo, com maior lucratividade para o produtor (BHATTACHARYYA *et al.*, 2013; SOUZA e GARCIA, 2013; SOUZA *et al.*, 2016).

Desta forma, é possível verificar que nas doses em torno de 50, 200 e  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça ocorreu uma redução nos teores de massa fresca e seca da parte aérea, consequentemente, diminuindo a produção de forragem (Figuras 12 e 13). Estes resultados podem ser associados ao fato das doses onde foram obtidas uma menor produção de forragem também terem sido obtidos teores foliares de alguns nutrientes acima do limite estabelecido como adequado para o desenvolvimento da cultura.

Neste caso, no ano agrícola de 2015, os teores de cálcio e magnésio no tecido foliar das plantas de milho ficaram acima do limite estabelecido como adequado, com concentrações superiores a  $0,40$  e  $0,50 \text{ dag kg}^{-1}$  de cálcio e magnésio, respectivamente. Do mesmo modo que no ano agrícola de 2013, na dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , foram obtidos teores foliares de  $0,18$  e  $0,13 \text{ dag kg}^{-1}$  para o cálcio e magnésio respectivamente. Tais resultados obtidos estão em torno de 28 e 13% abaixo do estabelecido para que a cultura se desenvolva e produza adequadamente em relação aos teores foliares de cálcio e magnésio, respectivamente. Esta diminuição na absorção destes elementos pela cultura pode ser associada à inibição competitiva com o potássio, que foi adicionado ao solo em maior quantidade via vinhaça (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007), justificando a redução na curva de produção da cultura nestas doses aplicadas.

Estes desequilíbrios nutricionais não foram observados nas doses entre  $100$  e  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, portanto, nas condições em que foi desenvolvido o presente estudo, para se obter uma maior produção de forragem a dose de vinhaça adequada está entre  $100$  e  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ . Uma vez que, na dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  a produção obtida também foi inferior, devido ao menor aporte de nutrientes ao solo, o que culminou em uma menor absorção de nutrientes pela cultura,

provocando uma deficiência de alguns elementos no tecido foliar das plantas de milho, entre eles o boro, com teores de 8,74, 9,42 e 9,80 mg kg<sup>-1</sup>, para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, o que representa um déficit médio de 6,80% de boro no tecido foliar da cultura nos três anos agrícolas.

Desta forma, a definição da dose de vinhaça adequada a ser aplicada mostrou ser um fator decisivo para auxiliar no desenvolvimento da cultura do milho, implicando não somente na melhoria da produção, mas certamente na melhoria da eficiência na aplicação e uso agrícola de um efluente com potencial poluidor.

#### 4.3.2 Grãos

Por meio dos resultados obtidos, após a análise de variância (Anexo F), verificou-se que a aplicação de vinhaça no cultivo do milho proporcionou alterações significativas ( $\alpha \leq 0,05$ ) nas variáveis peso da espiga, peso dos grãos e produção de grãos por hectare, no cultivo realizado com o intuito de produção de grãos.

Observando os valores médios destas variáveis nos três anos agrícolas, apresentados na Tabela 12, nota-se que o peso médio das espigas e peso dos grãos tiveram um comportamento semelhante nos três anos agrícolas, com uma produção inferior a obtida com o fornecimento da adubação mineral, na dose de vinhaça correspondente a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. No entanto, se observa que não houve diferenças significativas para estas variáveis nas demais doses aplicadas de vinhaça em relação à adubação mineral, nos três anos agrícolas.

Ainda na Tabela 12, observa-se que a produção de grãos nas doses correspondentes a 50 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça foi inferior à produção obtida com o fornecimento da adubação mineral, nos três anos agrícolas. Contudo, nas doses de 100 e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, a produção obtida foi superior à produção de grãos com a aplicação da adubação mineral (NPK), nos anos agrícolas de 2013 e 2014. No ano seguinte, este resultado se repetiu apenas na dose equivalente a 100 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. Por sua vez, as doses correspondentes a 100, 150 e 200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> condicionaram uma produção de grãos sem diferença significativa da obtida com a aplicação da adubação mineral, nos três anos agrícolas.

Tabela 12. Valores médios do peso da espiga completa, peso dos grãos e produção total de grãos por hectare da cultura do milho em função da adubação mineral e vinhaça nos três anos agrícolas

Tratamentos	2013		
	Peso da espiga (g)	Peso dos grãos (g)	Produção de grãos (t ha <sup>-1</sup> )
NPK	318,71 A	228,61 A	11,43 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	237,43 B	172,93 B	8,65 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	336,69 A	235,24 A	11,76 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	371,34 A	244,92 A	12,24 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	290,55 A	209,30 A	10,47 A
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	282,25 A	187,57 A	9,38 B
CV (%)	5,90	9,13	13,00
Tratamentos	2014		
	Peso da espiga (g)	Peso dos grãos (g)	Produção de grãos (t ha <sup>-1</sup> )
NPK	349,06 A	242,24 A	12,11 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	252,40 B	177,81 B	8,89 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	354,33 A	245,87 A	12,29 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	383,37 A	250,97 A	12,55 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	303,86 A	214,32 A	10,72 A
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	269,22 A	198,26 A	9,91 B
CV (%)	11,12	7,16	10,30
Tratamentos	2015		
	Peso da espiga (g)	Peso dos grãos (g)	Produção de grãos (t ha <sup>-1</sup> )
NPK	382,88 A	259,61 A	12,98 A
50 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	267,57 B	178,33 B	8,92 B
100 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	387,06 A	262,05 A	13,10 A
150 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	397,67 A	258,12 A	12,91 A
200 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	305,37 A	204,21 A	10,21 A
250 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	290,15 A	193,71 A	9,69 B
CV (%)	8,17	8,80	11,90

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente da adubação NPK (controle), ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. CV (%): Coeficiente de variação.

OBS: A produção total de grãos foi obtida multiplicando-se o peso médio dos grãos por espiga pela estimativa de produção de espigas, que foi de 50.000 espigas por hectare.

Tais resultados obtidos e apresentados na Tabela 12 demonstram que em até três safras a aplicação de doses entre 100 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça em um sistema de produção de milho possibilitou uma produção de grãos por espiga sem diferenças significativas em relação à produção obtida com a adubação mineral, o que demonstra o potencial agrônômico deste resíduo. Segundo Brunetto *et al.* (2012) e Lourenzi *et al.* (2016), o uso agrícola de efluentes apresenta potencial para condicionar um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das culturas, incorporando nutrientes e matéria orgânica ao solo, favorecendo os índices de produtividade.

Neste aspecto, a produção de grãos é considerada a porção mais nobre e rentável da espiga, sendo desejável que sua proporção em relação ao peso da espiga seja a maior possível (KARAM *et al.*, 2010; CANTELMO *et al.*, 2016). Neste caso, observou-se no presente estudo

que a proporção média de grãos produzida por espiga, já no primeiro ano (2013), foi de 71,73 e 69,87% com a aplicação da dose equivalente a  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça e da adubação mineral, respectivamente. Estes resultados obtidos concordam com os alcançados por Mendes *et al.* (2013), aplicando fontes de adubação nitrogenada no cultivo de diferentes híbridos de milho, obtendo em alguns casos uma proporção de grãos inferior a 50% do peso total da espiga.

De forma semelhante, no experimento implantado por Gott *et al.* (2014), no cultivo do milho híbrido para a produção de grãos, foi obtido em um sistema de cultivo convencional com o fornecimento de diferentes fontes de nitrogênio uma produção média em torno de  $9,00 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos. Estes resultados estão abaixo dos obtidos no presente estudo, pois com exceção da dose correspondente a  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  foi alcançada uma produção estimada acima de  $9,30 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos, nos três anos agrícolas, com a aplicação da adubação mineral e demais doses de vinhaça.

Contudo, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária unidade Milho e Sorgo, o potencial produtivo de grãos no Brasil é superior a  $16,00 \text{ t ha}^{-1}$ , entretanto a média da produção nacional na safra de 2014/2015 foi de  $5,01 \text{ t ha}^{-1}$ . Para o estado do Espírito Santo a produção média de grãos foi inferior, atingindo  $2,18 \text{ t ha}^{-1}$  na mesma safra (CONAB, 2016). Desta forma, nas condições em que foi desenvolvido o presente estudo, foi possível alcançar uma produção de grãos superior à média nacional e a do estado do Espírito Santo, tanto para a aplicação da adubação mineral quanto para as diferentes doses de vinhaça.

Alguns autores demonstraram que o fornecimento de adubação orgânica em pós-plantio tende a propiciar um maior aporte de nutrientes e matéria orgânica ao solo, resultando em maiores rendimentos de grãos para a cultura do milho (SANGOI *et al.*, 2002; INOUE *et al.*, 2011; QUEIROZ *et al.*, 2011). Além disso, resultados semelhantes aos deste estudo foram obtidos por Araújo *et al.* (2012), que ao estudarem diferentes genótipos de milho e sua resposta a aplicação de efluentes verificaram que nas áreas que receberam resíduos orgânicos houve um maior aporte de nutrientes e matéria orgânica, resultando em uma maior produtividade, em comparação ao cultivo convencional, assim como observado no presente estudo para as doses correspondentes a  $100$ ,  $150$  e  $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça.

Neste sentido, considerando as doses de vinhaça aplicadas, observa-se um incremento no desenvolvimento das espigas até as doses entre  $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , nos três anos agrícolas (Tabela 12). Contudo, a partir destas doses é nítido pela análise de regressão que houve uma queda na curva de produção, ou seja, é necessário definir a dose que auxilie na obtenção de um melhor desenvolvimento das espigas. Nas condições em que o presente estudo foi desenvolvido, ao derivarmos as curvas de produção, observa-se que no ano agrícola de 2013 a dose de vinhaça adequada para se obter um maior peso de espiga e de grãos foi de  $184,09$  e  $150,47 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ,

respectivamente, enquanto nos anos de 2014 e 2015 foram de 148,53 e 147,09 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para o peso da espiga e de 151,55 e 146,01 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> para o peso dos grãos, respectivamente (Figura 14).

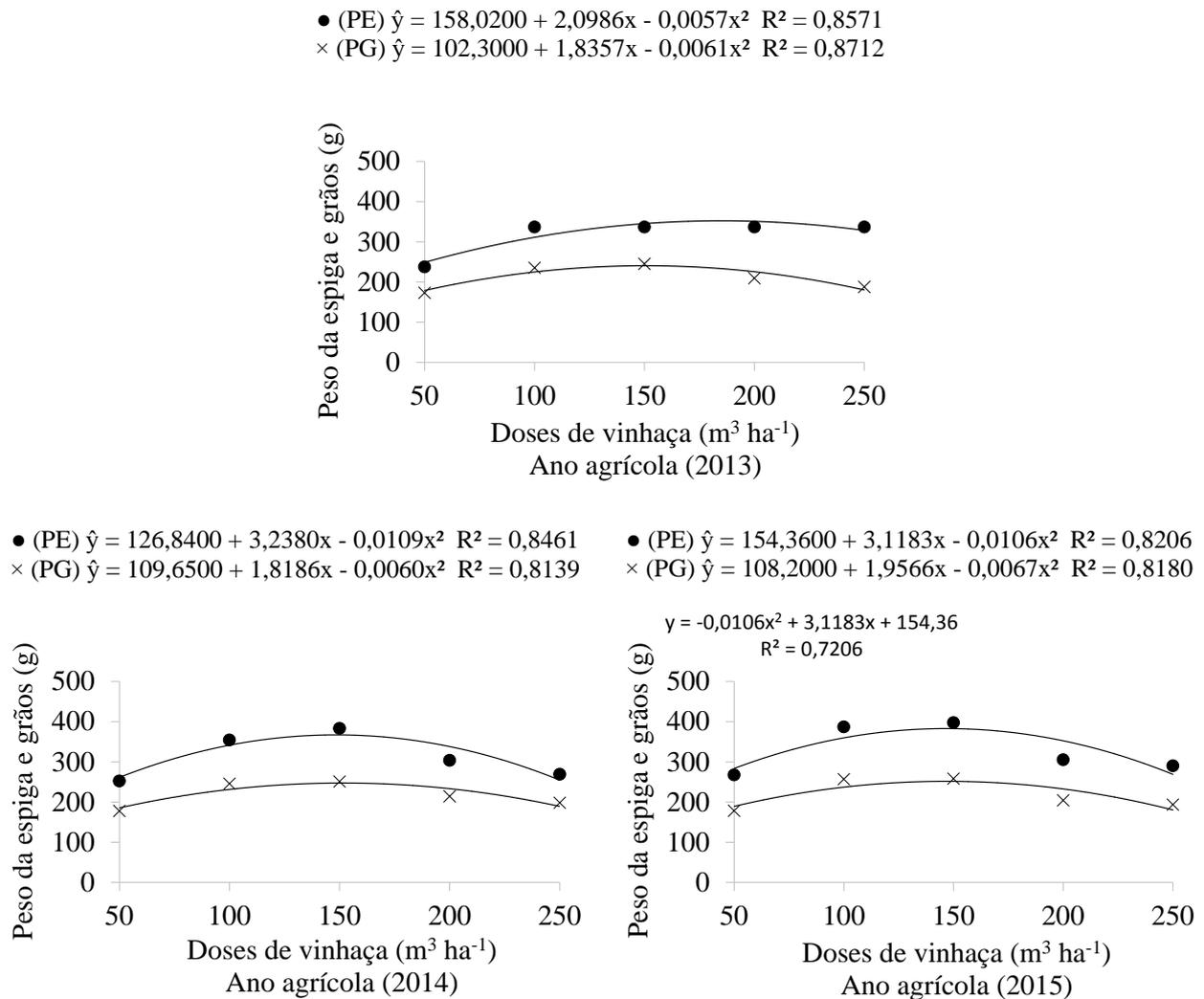


Figura 14. Peso da espiga completa (PE) e peso dos grãos (PG) da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Quanto ao desenvolvimento das espigas, nota-se na Figura 14 que nas doses de vinhaça em torno de 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> houve uma produção superior à obtida com as demais doses aplicadas, nos três anos agrícolas. Estes resultados podem ser associados em parte ao fato desta dose de vinhaça ter propiciado teores foliares de macro e micronutrientes em concentrações adequadas ao desenvolvimento da cultura. Em contrapartida, na dose de vinhaça correspondente a 50 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, alguns nutrientes ficaram em concentrações abaixo do necessário para o desenvolvimento da cultura, entre eles o boro, com teores de 8,74, 9,42 e 9,80 mg kg<sup>-1</sup>, para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, o que representa um déficit médio de 6,80% de boro no tecido foliar da cultura nos três anos agrícolas.

Por outro lado, nas maiores doses ( $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ) houve um acúmulo de alguns nutrientes no tecido foliar da cultura do milho, de forma que, no ano agrícola de 2015, os teores de cálcio e magnésio no tecido foliar das plantas de milho ficaram em concentrações de 0,57 e 0,84  $\text{dag kg}^{-1}$ , respectivamente, ou seja, estes teores foliares obtidos estão em média 13 e 80% acima do estabelecido para que a cultura se desenvolva e produza adequadamente em relação aos teores foliares de cálcio e magnésio, respectivamente (MARTINEZ *et al.*, 1999; PREZOTTI *et al.*, 2007).

Estes teores foliares obtidos justificam a redução na produção de grãos para esta dose aplicada, pois nestas condições de desequilíbrios nutricionais no tecido foliar da cultura, funções metabólicas, enzimáticas e fotossintéticas são afetadas, comprometendo o desenvolvimento e consequentemente a produtividade das culturas (FURLANI, 2004; TAIZ e ZEIGER, 2013).

Já na menor dose de vinhaça aplicada, correspondente a  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , foi possível obter um peso médio de espiga de 237,43, 252,40 e 267,57 gramas, para os anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente. Para o peso dos grãos, ainda na dose de  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , para estes mesmos anos, foi obtido peso de grãos de 172,93, 177,81 e 178,33 gramas, respectivamente (Tabela 12). Estes resultados correspondem a uma proporção média de grãos por espiga de 72,83, 70,45 e 66,65%, para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente.

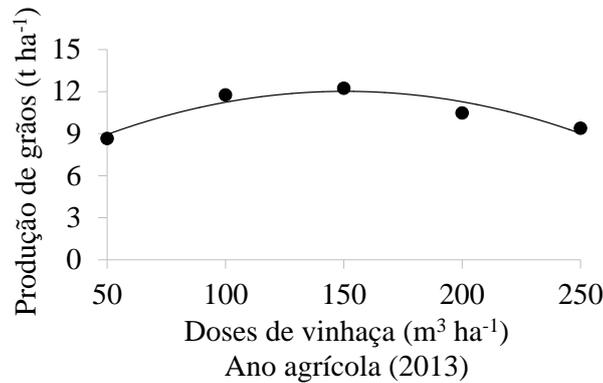
Contudo, a melhor proporção obtida foi verificada para a dose de vinhaça correspondente a  $250 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , com 73,64% do peso total da espiga em grãos, para o ano agrícola de 2014. Já o menor rendimento foi obtido para a dose equivalente a  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , com 65,01% de grãos por espiga para o ano de 2015 (Tabela 12). Estes resultados obtidos demonstram que de fato a definição da dose de vinhaça a ser aplicada é fator limitante para obter-se uma maior produção de grãos.

De maneira semelhante, em um estudo com oito cultivares de milho no estado de São Paulo, Moraes *et al.* (2010), obtiveram um desenvolvimento de espigas para o híbrido AG 1051 semelhantes aos obtidos no presente estudo, quando aplicou-se as doses entre 100 e  $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça. Tais resultados indicam que a cultura realmente é responsiva a aplicação da vinhaça até certa dose e a partir disso, responde de forma negativa com queda nos índices de produtividade.

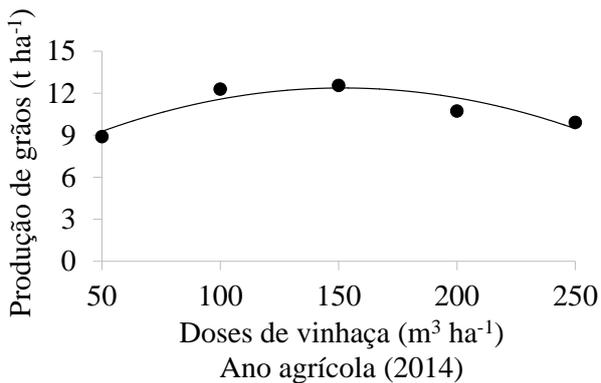
Neste sentido, quando observadas às curvas de produção de grãos por hectare nos três anos agrícolas, é possível verificar que houve um crescimento na produção até as doses correspondentes a 152,67, 152,16 e  $134,60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, e a partir destas doses, houve uma queda da produção (Figura 15). Desta forma,

deve-se atentar para a definição da dose de vinhaça a ser aplicada, de modo que possam ser supridas as exigências nutricionais da cultura sem afetar de forma negativa o seu rendimento.

$$\bullet \text{ (PG) } \hat{y} = 5,1240 + 0,0916x - 0,0003x^2 \quad R^2 = 0,8721$$



$$\bullet \text{ (PG) } \hat{y} = 5,4760 + 0,0913x - 0,0003x^2 \quad R^2 = 0,8154$$



$$\bullet \text{ (PG) } \hat{y} = 3,6160 + 0,1346x - 0,0005x^2 \quad R^2 = 0,9778$$

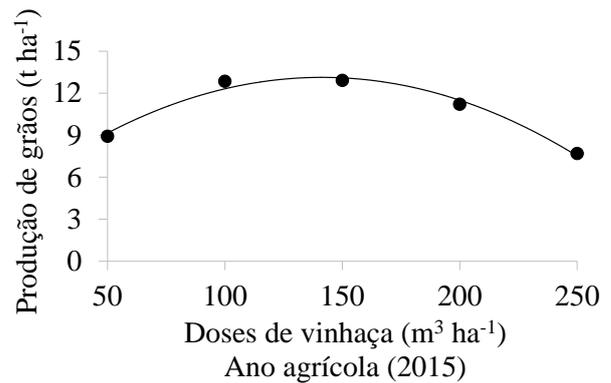


Figura 15. Produção de grãos (PG) da cultura do milho em função das doses de vinhaça aplicadas nos três anos agrícolas.

Portanto, para todas as doses de vinhaça aplicadas, nas três safras, foi possível obter uma produção de grãos de milho acima da média nacional e do estado do Espírito Santo. Sendo que, na dose de vinhaça equivalente a 100 m³ ha⁻¹ foi obtido o melhor rendimento de grãos, atingindo 13,10 t ha⁻¹ para o ano agrícola de 2015. Já o pior rendimento foi obtido para a menor dose de vinhaça aplicada (50 m³ ha⁻¹), no ano agrícola de 2013, com uma produção de grãos correspondente a 8,65 t ha⁻¹ (Tabela 12 e Figura 15).

Alguns autores afirmam que a produtividade do milho com a aplicação da adubação orgânica tende a ser superior a obtida com a adubação mineral, devido ao aporte de matéria orgânica ao solo, aumentando a disponibilidade de nutrientes, além de manter a umidade do solo.

Contudo, quando o volume de adubo orgânico necessário é muito grande, em alguns casos, pode inviabilizar sua aplicação (INOUE *et al.*, 2011; QUEIROZ *et al.*, 2011; ARAÚJO *et al.*, 2012).

Entretanto, para que o uso agrícola de efluentes seja uma atividade que apresente resultados técnicos, econômicos e ambientais favoráveis, o manejo e a aplicação das doses adequadas destes resíduos devem ser parte integrante do processo de produção, para que sejam fornecidos nutrientes balanceados para compensar a remoção pela cultura, possibilitando manter uma sustentabilidade do sistema produtivo (DOBERMANN *et al.*, 2003; KHURANA *et al.*, 2008; PASUQUIN *et al.*, 2014).

Portanto, se utilizada com critérios técnicos e em doses adequadas à vinhaça torna-se um subproduto de interesse agrônomo, apresentando possibilidades reais de uso em cultivos agrícolas, assim como, demonstrado com os resultados obtidos no presente estudo. Deste modo, a vinhaça pode ser utilizada como fonte de inserção de nutrientes e matéria orgânica ao solo. Contudo, para a sua utilização deve ser respeitada a dose adequada a ser aplicada de acordo com as diretrizes técnicas fundamentadas nas exigências nutricionais da cultura instalada.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que:

1. O uso agrícola da vinhaça nas doses superiores a  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , durante três anos, apresentou potencial para melhorar a fertilidade do solo, contribuindo com o aumento nos teores de P, K, Ca, Mg e MO, além de reduzir o teor de Al. Estas alterações foram mais expressivas nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm.

2. As doses de vinhaça superiores a  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  promoveram teores foliares de N, P, K, S, Ca, Mg e B, semelhantes àqueles obtidos com o fornecimento da adubação mineral, nas três safras.

3. Quanto à produção de forragem, os maiores rendimentos foram obtidos nas doses correspondentes a 123,61, 133,42 e  $130,77 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , nos anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, com uma produção superior a  $50 \text{ t ha}^{-1}$ , nas três safras.

4. Para a produção de grãos, os melhores rendimentos foram obtidos nas doses correspondentes a 152,67, 152,16 e  $134,60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , para os anos agrícolas de 2013, 2014 e 2015, respectivamente, com uma produção superior a  $12 \text{ t ha}^{-1}$ , nas três safras.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em um contexto geral e de forma sucinta, pode-se dizer que os conhecimentos obtidos por meio do desenvolvimento desta Tese permitiram observar que no cultivo do milho durante três safras houve melhorias nos atributos químicos do solo, bem como nos teores foliares de macro e micronutrientes da cultura, advindos da aplicação da vinhaça. Além disso, a produção variou entre as safras, nos três anos agrícolas, de acordo com as diferentes doses de vinhaça aplicadas.

Contudo, três anos de estudo é um período relativamente curto, quando se trata de estudar o efeito de um efluente aplicado anualmente em uma área agrícola. Desta maneira, recomenda-se que o presente estudo seja repetido por mais alguns anos, com o uso da vinhaça na mesma área, a fim de verificar se em longo prazo este efluente comprometerá os atributos químicos e/ou físicos do solo, além de afetar a produtividade da cultura, permitindo assim, se for o caso, definir possíveis técnicas de manejo para mitigar tais danos.

Além disso, quanto ao estudo da fertilidade do solo, foram observadas alterações nos atributos químicos do solo na maior profundidade estudada (até 40 cm), portanto, recomenda-se que em trabalhos futuros com o uso agrícola de efluentes líquidos, principalmente a vinhaça, sejam monitoradas as possíveis variações advindas do efluente em maiores profundidades, pelo menos até 60 cm.

Ao longo deste estudo, verificou-se na grande maioria das vezes, que o estudo do uso agrícola da vinhaça é voltado para a cultura da cana-de-açúcar, por geralmente, as lavouras estarem implantadas próximas às usinas e destilarias, o que facilita o transporte e a aplicação da vinhaça. Desta forma, a aplicação da vinhaça em outras culturas é pouco explorada, portanto, de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, recomenda-se a aplicação da vinhaça na cultura do milho, bem como, a aplicação da metodologia apresentada nesta Tese em outras culturas de interesse agrícola.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. P.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 56. 1998. 300p.

ALMEIDA, B. G.; DONAGEMMA, G. K.; RUIZ, H. A.; BRAIDA, J. A.; VIANA, J. H. M.; REICHERT, J. M. M.; OLIVEIRA, L. B.; CEDDIA, M. B.; WADT, P. S.; FERNANDES, R. B. A.; PASSOS, R. R.; DECHEN, S. C. F.; KLEIN, V. A.; TEIXEIRA, W. G. **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil.** Rio de Janeiro: EMBRAPA. 2012. 11p. (Comunicado técnico, 66).

ALMEIDA NETO, O. B.; MATOS, A. T.; ABRAHÃO, W. A. P.; COSTA, L. M.; DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1571-1581, 2009.

ALVARENGA, R. C.; GONTIJO NETO, M. M.; CRUZ, J. C. **Cultivo do milho: sistema de Produção.** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG. Versão Eletrônica, 6ª edição. 2010.

ARAÚJO, N. C.; FERREIRA, T. C.; OLIVEIRA, S. J. C.; GONÇALVES, C. P.; ARAÚJO, F. A. C. Avaliação do uso de efluente de casas de farinha como fertilizante foliar na cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Engenharia na Agricultura**, v.20, p.340-349, 2012.

ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; FROTA JUNIOR, J. I.; SANTOS, J. C. N. Identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da Bacia do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.40, n.3, p.346-355, 2009.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura.** Campina Grande, Universidade Federal da Paraíba, 1999. 218p.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola.** 4ª edição. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237p.

BARBOSA, E. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R.; SILVA, T. J.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.952-958, 2012.

BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A.; BARRETTO, M. C. V.; MELO, A. S. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.341-346, 2010.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; POLETTO, R. D. N.; GIROTTO, E. Dejeito líquido de suínos: perdas de nitrogênio e fósforo por percolação no solo sob plantio direto. **Ciência Rural**, v.35, p.1305-1312, 2005.

BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; LAMEGO, F. P.; SOMAVILLAI, L.; BRIGO, T. J. Vinhaça como fonte de potássio: resposta da sucessão aveia-preta/milho silagem/milho safrinha e alterações químicas do solo na Região Noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v.43, n.4, p.596-602, 2013.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8ª edição. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625p.

BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reuso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária**, v.1, p.152-169, 2008.

BEVILACQUA, P. D.; KOPSHITZ, X. B. R. Utilização de esgotos sanitários para produção de alimentos para animais: aspectos sanitários e produtivos. **Revista Ceres**, v.56, n.4, p.480-487, 2009.

BHATTACHARYYA, R.; PANDEY, S. C.; BISHT, J. K.; BHATT, J. C.; GUPTA, H. S.; TUTI, M. D.; MAHANTA, D.; MINA, B. L.; SINGH, R. D.; CHANDRA, S.; SRIVASTVA, A. K.; KUNDU, S. Tillage and irrigation effects on soil aggregation and carbon pools in the indian sub-himalayas. **Agronomy Journal**, v.105, p.101-112, 2013.

BOLZANI, H. R.; OLIVEIRA, D. L. A.; LAUTENSCHLAGER, S. R. Efeito da aplicação de água residuária de suinocultura no solo e na qualidade dos seus lixiviados. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.4, p 385-392, 2012.

BONINI, M. A.; SATO, L. M.; BASTOS, R. G.; SOUZA, C. F. Changes in the chemical and physical products of a red-soil irrigated with wastewater and vinasse. **Journal of Biosciences**, v.20, n.1, p.56-63, 2014.

BRASIL. Estado do Espírito Santo. Decreto número 1.777 de 8 de janeiro de 2007. Dispõe sobre a regulamentação do sistema de licenciamento e controle das atividades poluidoras ou degradadoras do meio ambiente.

BRASIL. Estado do Espírito Santo. Instrução Normativa número 007 de 21 de junho de 2006. Dispõe sobre os critérios técnicos referentes à outorga para diluição de efluentes em corpos de água superficiais.

BRASIL. Estado do Espírito Santo. Lei número 5.818 de 29 de dezembro de 1998b. Dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos e estabelece o sistema integrado de gerenciamento e monitoramento dos recursos hídricos.

BRASIL. Estado do Espírito Santo. Lei número 10.098 de 15 de outubro de 2013. Dispõe sobre o cadastro técnico estadual de atividades potencialmente poluidoras ou utilizadoras de recursos ambientais.

BRASIL. Lei nacional número 9.433 de 8 de janeiro de 1997. Dispõe sobre o gerenciamento dos recursos hídrico.

BRASIL. Lei nacional número 9.605 de 12 de fevereiro de 1998a. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério do Estado do Interior. Portaria número 158 de 3 de novembro de 1980. Dispõe sobre o lançamento em coleções hídricas e sobre efluentes das destilarias de usinas de açúcar.

BRASIL. Ministério do Estado do Interior. Portaria número 323 de 29 de novembro de 1978. Dispõe sobre o lançamento direto ou indireto da vinhaça, em qualquer corpo hídrico.

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Teores de potássio e sódio no lixiviado e em solos após a aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.52-56, 2005.

BRUNETTO, G.; COMIN, J. J.; SCHMITT, D. E.; GUARDINI, R.; MEZZARI, C. P.; OLIVEIRA, B. S.; MORAES, M. P.; GATIBONI, L. C.; LOVATO, P. E.; CERETTA, C. A. Changes in soil acidity and organic carbon in a sandy Typic Hapludalf after medium-term pig slurry and deep-litter application. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.1620-1628, 2012.

CANTELMO, N. F.; PINHO, R. G.; PINHO, É. V. R. V.; CAMARGO, R. B.; PIRES, L. P.; PINHO, I. V. V. Fluxo gênico em milho sob diferentes tamanhos de amostras e distâncias de amostragem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, n.2, p.328-334, 2016.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; MARQUES, O. M.; SILVA, A. R.; TASSO JUNIOR, L. C. Evaluation of heavy metal contents in soil and sugarcane plant with addition of sewage sludge and vinasse. **Journal of Biosciences**, v.25, n.23, p.23-31, 2009.

CARVALHO, A. V.; BRANDÃO, J. S.; BRANDÃO, P. A.; SOUZA, B. B.; FERREIRA, D. H.; SILVA, D. R. P.; BATISTA, N. L. Farelo de palma forrageira na fase final de criação, sobre o desempenho de codornas de corte criadas no semiárido. **Revista Científica de Produção Animal**, v.14, n.2, p.177-180, 2014.

CBRC. Centro Brasileiro de Referência da Cachaça. **Números da cachaça**: exportações de cachaça 2015. Disponível em: < <http://www.ibrac.net>>. Acesso em: 24 de junho de 2016.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by Sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station, Bulletin, 670, 1942. 124p.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Journal Waste Management**, v.33, p.2752-2761, 2013.

CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Balanco de 2015 e perspectivas de 2016**. Disponível em: <[www.cna.org.br](http://www.cna.org.br)>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.

COELHO, A. M.; FRANÇA, g. e. **Seja o doutor do seu milho: nutrição e adubação**. Piracicaba, SP: POTAFOS, 1995. (Arquivo do agrônomo, n.2).

CONAB. Campanha Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento das safras brasileiras de 2015**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 12 de janeiro de 2016.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 357 de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2016.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 430 de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama>>. Acesso em 23 de fevereiro de 2016.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. **Cálculo da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar**. EMBRAPA, Bento Gonçalves, RS. Comunicado Técnico 61. 2005.

COSTA, F. R.; DAMASO, L. F.; MENDES, R. C.; MARQUES, D. D.; RODRIGUES, F. Desempenho de híbridos de milho para consumo *in natura* em diferentes doses de nitrogênio. **Revista Científica**, v.43, n.2, p.109-116, 2015.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; GONTIJO NETO, M. M. **Milho para silagem**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG. 2012. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONT000fy779fnk02wx5ok0pvo4k3j537ooi.html>>. Acesso em: 11 de agosto de 2016.

CRUZ, Z. S.; ANDRADE, I. C. B.; SOUZA, R. R.; FACCIOLI, G. G. Efluentes da indústria canavieira do estado de Sergipe. **Revista Exata e Tecnológica**, v.2, n.2, p.27-36, 2016.

DANTAS, L. G.; SANTOS, C. A. C. D.; OLINDA, R. A. D. Trends in annual and seasonal temperature and precipitation extremes in Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.30, n.4, p.423-434, 2015.

DARTORA, J.; GUIMARÃES, V. F.; MARINI, D.; SANDER, G. Adubação nitrogenada associada à inoculação com *Azospirillum brasilense* e *Herbaspirillum seropedicae* na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.10, p.1023-1029, 2013.

DERERIE, D. Y.; TROBRO, S.; MOMENI, M. H.; HANSSON, H.; BLOMQVIST, J. Improved bio-energy yields via sequential ethanol fermentation and biogas digestion of steam exploded oat straw. **Bioresource Technology**, v.102, p.4449-4455, 2011.

DOBERMANN, A.; WITT, C.; ABDULRACHMAN, S.; GINES, H. C.; NAGARAJAN, R.; SON, T. T.; TAN, P. S.; WANG, G. H.; CHIEN, N. V.; THOA, V. T. K.; PHUNG, C. V.; STALIN, P.; MUTHUKRISHNAN, P.; RAVI, V.; BABU, M.; SIMBAHAN, G. C.; ADVIENTO, M. A.; BARTOLOME, V. Estimating indigenous nutrient supplies for site specific nutrient management in irrigated rice. **Agronomy Journal**, v.95, p.924-935, 2003.

DOELSCH, E.; MASON, A.; CAZEVIEILLE, P.; CONDOM, N. Spectroscopic characterization of organic matter of a soil and vinasse mixture during aerobic or anaerobic incubation. **Waste Management**, v.29, n.6, p.1929-1935, 2009.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª edição. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 627p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª edição. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353p.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 254p.

FURLANI, A. M. C. **Nutrição mineral**. In: KERBAUY, G. B. Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2004. 452p.

GARCIA-MINA, J. M.; ANTOLÍN, M. C.; SANCHEZ-DIAS, M. Metal-humic complexes and plant micronutrient uptake: a study based on different plant species cultivated in diverse soils types. **Plant and Soil**, v.258, p.57-68, 2004.

GONZÁLEZ, V. R.; MAYER, J. G.; SEIJAS, N. R.; VARALDO, H. M. P. Treatment of mezcal vinasses: a review. **Journal of Biotechnology**, v.157, p.524-546, 2012.

GOTT, R. M.; SICHOCKI, D.; AQUINO, L. A.; XAVIER, F. O.; SANTOS, L. P. D.; AQUINO, R. F. B. Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio no milho safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13, n.1, p.24-34, 2014.

GUNKEL, G.; KOSMOL, J.; SOBRAL, M.; ROHN, H.; MONTENEGRO, S.; AURELIANO, J. Sugar cane industry as a source of water pollution case study on the situation in Ipojuca river Pernambuco Brazil. **Water Air Soil Pollut**, v.180, p.261-269, 2007.

HAGVALL, K.; PERSSON, P.; KARLSSON, T. Speciation of aluminum in soils and stream waters: The importance of organic matter. **Chemical Geology**, v.417, p.32-43, 2015.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HUTNAN, M.; HORNAK, M.; BODÍK, I.; HLAVACKA, V. Anaerobic treatment of wheat stillage. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v.17, n.3, p.233-241, 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatística da produção agrícola**. 2015. 102p.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Monitoramento agrometeorológico**. Disponível em: <<http://www3.ceunes.ufes.br/estacao/index2.asp?estacao=A617>>. Acesso em: 13 de maio de 2016.

INOUE, K. R. A.; SOUZA, C. F.; MATOS, A. T.; SANTOS, N. T.; FERREIRA, W. P. M. Concentração de nutrientes em plantas de milho, adubadas com biofertilizantes, obtidos na digestão anaeróbia da manipueira. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.19, p.236-243, 2011.

JIANG, Z. P.; LI, Y. R.; WEI, G. P.; LIAO, Q.; SU, T. M.; MENG, Y. C.; ZHANG, H. Y.; LU, C. Y. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. **Journal Sugar Tech**, v.14, p.412-417, 2012.

KARAM, D.; PEREIRA FILHO, I. A.; MAGALHÃES, P. C.; PAES, M. C. D.; SILVA, J. A.; GAMA, J. C. M. Resposta de plantas de milho à simulação de danos mecânicos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, n.2, p.201-211, 2010.

KENIMER, A.; JNAD, I.; LESIKAR, B.; SABBAGH, G. Subsurface Drip Dispersal of Residential Effluent: II. Soil Hydraulic Characteristics. **American Journal Society of Agricultural Engineers**, v.44, n.5, p.23-29, 2011.

KHURANA, H. S.; PHILIPS, S. B.; SINGH, B.; ALLEY, M. M. DOBERMANN, A.; SIDHU, A. S.; SINGH, Y.; PENG, S. B. Agronomic and economic evaluation of site-specific nutrient management for irrigated wheat in northwest India. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.82, n.1, p.15-31, 2008.

LAMAISON, F. C.; ANDRADE, P. A. M.; BIGATON, A. D.; ANDREOTE, F. D.; ANTONIO, R. V.; REGINATTO, V. Long-term effect of acid and heat pretreatment of sludge from a sugarcane vinasse treatment plant on the microbial community and on thermophilic biohydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v.40, p.14124-14133, 2015.

LANGE, A.; FERREIRA, A. C. T.; LEMKE, A. F.; BUCHELT, A. C.; BORSA, C. D.; SCHONINGER, E. L. Pasto, silagem e palhada no sistema de integração lavoura-pecuária na região norte do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n.3, p.293-306, 2013.

LÁZARO, R. L.; COSTA, A. C. T.; SILVA, K. F.; SARTO, M. V. M.; DUARTE JÚNIOR, J. B. Produtividade de milho cultivado em sucessão à adubação verde. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.43, p.10-17, 2013.

LIMA, D. C.; CHAVES, M.; LIMA, A. C.; LIMA, D. L. **Reuso de água para a irrigação: uma abordagem reflexiva**. Crato, CE: Urca, 2012. 188p.

LIMA, R. P.; ROLIM, M. M.; DANTAS, M. S. M.; COSTA, A. R. F. C.; DUARTE, A. S.; SILVA, A. R. Atributos químicos de um Neossolo Regolítico distrófico em função das doses e tempos de aplicação de vinhaça. **Revista Agroambiente Online**, v.7, n.3, p.262-268, 2013.

LIRA, R. M.; SANTOS, A. N.; SILVA, J. S.; BARNABÉ, J. M. C.; BARROS, M. S.; RAMALHO, H. The use of lower quality water in irrigated agriculture. **Environmental Sciences**, v.3, n.1, p.62-83, 2015.

LOPES, O. M. M.; CARRILHO, E. N. V. M.; LOPES-ASSAD, M. L. R. C. Effect of rock powder and vinasse on two types of soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1547-1557, 2014.

LÓPEZ, A. L.; VÁZQUEZ, G. D.; BECERRIL, E. L.; GARCÍA, E. V.; VALDEZ, J. G. Tequila vinasses: generation and full scale treatment processes. **Environmental Science Biotechnological**, v.9, p.109-116, 2010.

LOURENZI, C. R.; SCHERER, E. S.; CERETTA, C. A.; TIECHER, T. L.; CANCIAN, A.; FERREIRA, P. A. A.; BRUNETTO, G. Atributos químicos de Latossolo após sucessivas aplicações de composto orgânico de dejetos líquido de suínos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.3, p.233-242, 2016.

MALAVOLTA, E. **O futuro da nutrição de plantas tendo em vista aspectos agronômicos, econômicos e ambientais**. São Paulo, SP: Informações Agronômicas, 2008. 121p.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2ª edição (atualizada e ampliada). Viçosa, MG: UFV, 2009. 355p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Balanco da cana-de-açúcar e agroenergia nacional**. MAPA/SPAEE, Brasília, 2007a. 140p.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes minerais, orgânicos, organominerais e corretivos**. Brasília: MAPA/SDA/CGAL, 2007b. 220p.

MARQUES, M. O. **Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça**. Piracicaba: EDITORAL. 2006. 375p.

MARTINEZ, E. P. H.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. **Diagnose foliar**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais - CFSEMG, 1999. 359p.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; ROSA, J. D.; GATIBONI, L. C. Relação cálcio-magnésio do corretivo da acidez do solo na nutrição e no desenvolvimento inicial de plantas de milho em um Cambissolo Húmico Áplico. **Semina: Ciências Agrárias**, v.29, n.04, p.799-806, 2008a.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; NEVES, J. C. L.; MATOS, A. T.; SOUZA, J. A. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo das alterações químicas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.603-612, 2005.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, A. A.; FERREIRA, P. A.; NEVES, J. C. L.; SOUZA, J. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.2, p.109-115, 2008b.

MENDES, M. C.; MATCHULA, P. H.; ROSSI, E. S.; OLIVEIRA, B. R.; SILVA, C. A.; SÉKULA, C. R. Adubação nitrogenada em cobertura associada com densidades populacionais de híbridos de milho em espaçamento reduzido. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.12, n.2, p.92-101, 2013.

MORAES, A. R. A. D.; LOURENÇÃO, A. L.; PATERNIANI, M. E. A. G. Resistência de híbridos de milho convencionais e isogênicos transgênicos a *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). **Bragantia**, v.74, n.1, p.50-57, 2015.

MORAES, A. R. A. D.; RAMOS JÚNIOR, E. U.; GALLO, P. B.; PATERNIANI, M. E. A. G.; SAWASAKI, E.; DUARTE, A. P.; GUIMARÃES, P. D. S. Desempenho de oito cultivares de milho-verde na safrinha, no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.9, n.1, p.79-91, 2010.

MÔRO, G. V.; FRITSCH NETO, R. **Importância e usos do milho no Brasil**. In GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. Milho: do plantio à colheita. Editora: UFV, Viçosa, MG, 2015. 351p.

NAIR, R. B.; TAHERZADEH, M. J. Valorization of sugar-to-ethanol process waste vinasse: A novel biorefinery approach using edible ascomycetes filamentous fungi. **Bioresource Technology**, v.221, p.469-476, 2016.

NEUMANN, M.; SANDINI, I. E.; LUSTOSA, S. B. C.; OST, P. R.; ROMANO, M. A.; FALBO, M. K.; PANSERA, E. R. Rendimentos e componentes de produção da planta de milho (*Zea mays* L.) para silagem, em função de níveis de adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.4, n.3, p.418-427, 2005.

NOGUEIRA, C. E. C.; SOUZA, S. N. M.; MICUANSKI, V. C.; AZEVEDO, R. L. Exploring possibilities of energy insertion from vinasse biogas in the energy matrix of Paraná State, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.48, p.300-305, 2015.

OLIVEIRA, J. S.; SOUZA SOBRINHO, F.; PEREIRA, R. C.; MIRANDA, J. M.; BANYS, V. L.; RUGGIERI, A. C.; PEREIRA, A. V.; LEDO, F. S.; BOTREL, M. A.; AUAD, M. V. Potencial de utilização de híbridos comerciais de milho para silagem, na região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.1, p.62-71, 2003.

ONU. Organização das Nações Unidas. **The earth summit strategy to save our planet. AGENDA 21**. Ed. Daniel Sitarz, Earthpress, Boulder Colorado. 1994, 321p.

PALARETTI, L. F.; DALRI, A. B.; DANTAS, G. F.; FARIA, R. T.; SANTOS, W. F.; SANTOS, M. G. Produtividade do manjeriço (*Ocimum basilicum* L) fertirrigado utilizando vinhaça concentrada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.9, n.5, p.326-334, 2015.

PASUQUIN, J. M.; PAMPOLINO, M. F.; WITT, C.; DOBERMANN, A.; OBERTHÜR, T.; FISHER, M. J.; INUBUSHI, K. Closing yield gaps in maize production in Southeast Asia through site-specific nutrient management. **Journal Field Crops Research**, v.156, p.219-230, 2014.

PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II Características da cana-de-açúcar, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.244-249, 2011.

PINHO, R. G. V.; SANTO, Á. O.; PINHO, I. V. V. **Botânica**. In GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. Milho: do plantio à colheita. Editora: UFV, Viçosa, MG, 2015. 351p.

PREZOTTI, L. C., GOMES, J. A., DADALTO, G. G., OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo**. 5ª aproximação. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305p.

QUEIROZ, A. M.; SOUZA, C. H. E.; MACHADO, V. J.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H.; SILVA, A. A. Avaliação de diferentes fontes e doses de nitrogênio na adubação da cultura do milho (*Zea mays* L.). **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.10, n.3, p.257-266, 2011.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes para o estado de Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa. CFSEMG, 1999. 325p.

ROLIM, M. M.; LYRA, M. R. C.; DUARTE, A. M.; MEDEIROS, P. R. F.; SILVA, Ê. F. F.; PEDROSA, E. M. R. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática. **Revista Ambiente e Água**, v.8, n.1, p.155-171, 2013.

SANGOI, L.; ALMEIDA, M. L.; SILVA, P. R. F.; ARGENTA, G. Bases morfofisiológicas para maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. **Bragantia**, v.61, n.2, p.101-110, 2002.

SANTOS, M. Z.; NEITZKE, D. F.; GENERO, A. D.; NEVES, R. S.; NEITZKE, B. C.; GRILLO, J. F. Estudo comparativo entre a eficiência de diferentes formas de adubação na cultura da cana-de-açúcar. **Revista de Ciências Agrárias**, v.7, n.1, p.20-26, 2012.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M. G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.811-820, 2010.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.1, p.38-43, 2014a.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, A. P.; ALVES, G. S.; OLIVEIRA, A. N. P.; ARAÚJO, M. A. M.; SILVA, J. A. Avaliação do pH e do teor de matéria orgânica do solo após colheita do inhame adubado com esterco bovino e biofertilizante. **Revista Horticultura Brasileira**, v.29, n.2, p.1-7, 2011.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.1, p.108-114, 2007.

SILVA, N. F.; LELIS NETO, J. A.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; MIRANDA, J. H.; COELHO, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Irriga**, Edição Especial, p.340-350, 2012.

SILVA, W. P.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, Ê, F. F.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, V. G. F. Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.394-401, 2014b.

SORATTO, A. N.; VARVAKIS, G.; HORII, J. A certificação agregando valor à cachaça. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v.27, n.4, p.681-687, 2007.

SOUZA, J. L.; GARCIA, R. D. C. Custos e rentabilidades na produção de hortaliças orgânicas e convencionais no estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v.3, n.1, p.11-24, 2013.

SOUZA, J. L.; GUIMARÃES, G. P. Mass fertilizer yield and the impact on soil fertility in succession of organic crops. **Bioscience Journal**, v.29, n.6, p.1796-1805, 2013.

SOUZA, J. V. R. S.; SAADA, J. C. C.; SÁNCHEZ-ROMÁNA, R. M.; RODRÍGUEZ-SINOBAS, L. No-till and direct seeding agriculture in irrigated bean: Effect of incorporating crop residues on soil water availability and retention, and yield. **Agricultural Water Management**, v.170, p.158-166, 2016.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A. F. **Perdas de nutrientes**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa: Agricultura e Meio Ambiente. Brasília, DF, 2014. 40p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5ª edição. Porto Alegre, RS: Artmed, 2013. 954p.

TEJADA, M.; GONZALEZ, J. L. Effects of two beet vinasse forms on soil physical properties and soil loss. **Catena Journal**, v.68, p.41-50, 2006.

TEJADA, M.; MARTÍNEZ, A. M.; PARRADO, J. Effects of a composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. **Catena Journal**, v.77, p.238-247, 2009.

UNGARO, M. R. G.; LAGO, A. A.; MARIN, G. C. Efeito da vinhaça no desenvolvimento inicial de girassol, mamona e amendoim em casa de vegetação. **Bragantia**, v.67, n.3, p.685-692, 2008.

UYEDA, C. A.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, P. R. F.; DIAS, C. T. S. Avaliação dos efeitos da aplicação de vinhaça em características físico-químicas de diferentes solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.33, p.1-10, 2013.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; SILVA, A. J. N.; OLIVEIRA, V. S.; SILVA, Y. J. A. B. Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo Distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.639-648, 2010.

VERGUTZ, L.; NOVAIS, R. F. **Recomendação de corretivos e adubação**. In GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. Milho: do plantio à colheita. Editora: UFV, Viçosa, MG, 2015. 351p.

VIEIRA, A. F.; NUNES, R. L. C.; TORRES, R. A. T.; DIAS, N. S.; OLIVEIRA, A. B. Avaliação agrônômica de híbridos de milho para silagem em Baraúna, região semiárida nordestina. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.14, n.2, p.283-290, 2015.

ZHAO, J.; CHENA, S.; HUA, R.; LI, Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. **Soil & Tillage Research**, v.167, p.73-79, 2017.

ZIECH, A. R. D.; CONCEIÇÃO, P. C.; HEBERLE, C. T.; CASSOL, C.; BALIM, N. M. Produtividade e componentes de rendimento de milho em função de plantas de cobertura e doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, n.2, p.195-201, 2016.

ZOLIN, C. A.; PAULINO, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. L. S.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.1, p.22-28, 2011.

## 8 ANEXOS

ANEXO A. Resumo da análise de variância do pH, fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e matéria orgânica (MO) do solo nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, no ano agrícola de 2013

<b>Profundidade (0 a 10 cm) - 2013</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	8,8163 <sup>ns</sup>	43,93043*	7,83494 <sup>ns</sup>	4,9384*	4,83743 <sup>ns</sup>	1,34200 <sup>ns</sup>	8,45435 <sup>ns</sup>	234,2423 <sup>ns</sup>
Adubação	5	781,9102*	382,3432*	6721,232*	2783,812*	10823,89*	345,9384*	392,9288*	23,9834*
Resíduo	15	13,93484	6,93947	67,98338	18,98405	31,83844	2,394	2,8374878	637,9324
Total	23								
Média geral		4,023	13,829	78,923	4,012	1,9203	0,6293	0,3932	5,0231
CV (%)		5,934	6,8394	12,892	11,292	18,723	4,821	13,230	9,543
<b>Profundidade (10 a 20 cm) - 2013</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	9,3422*	52,8734*	6,98244*	3,8322 <sup>ns</sup>	6,3433 <sup>ns</sup>	1,98392 <sup>ns</sup>	10,3423 <sup>ns</sup>	652,9283*
Adubação	5	673,343*	678,933*	8352,232*	3982,839*	11982,432*	728,5133*	564,3438*	41,93874*
Resíduo	15	28,9344	6,0909	32,9834	22,9384	33,9384	3,83334	3,45534	434,83474
Total	23								
Média geral		5,934	12,934	89,8734	4,983	1,984	0,834	0,5534	5,663
CV (%)		6,833	6,003	9,82	12,677	11,829	10,011	3,87	26,34
<b>Profundidade (20 a 40 cm) - 2013</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	11,284*	45,3453*	7,34344 <sup>ns</sup>	5,3332*	4,34543 <sup>ns</sup>	2,345*	14,34433 <sup>ns</sup>	1092,432*
Adubação	5	892,3423*	899,3433*	10723,34*	11,343*	9893,344*	912,243*	673,03941*	34,34781*
Resíduo	15	31,344	8,93844	33,34434	31,344	34,3484	5,23443	6,455321	523,343
Total	23								
Média geral		6,02	17,7364	98,734	3,893	3,093	0,897	0,555	6,343
CV (%)		13,992	4,93	12,984	11,623	7,43	9,112	5,348	8,982

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

ANEXO B. Resumo da análise de variância do pH, fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e matéria orgânica (MO) do solo nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, no ano agrícola de 2014

<b>Profundidade (0 a 10 cm) - 2014</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	10,6347*	34,2344*	5,32434 <sup>ns</sup>	7,23444 <sup>ns</sup>	6,9234 <sup>ns</sup>	3,23431*	9,376425 <sup>ns</sup>	123,122 <sup>ns</sup>
Adubação	5	698,934*	423,9323*	9871,3847*	1896,985*	9639,0324*	762,9287*	411,9237*	17,78235*
Resíduo	15	18,34242	11,9273	45,9837	23,726	102,76234	4,7872	4,81273	508,9218
Total	23								
Média geral		5,873	15,893	100,34	4,23	1,98	0,76	0,399	7,32
CV (%)		11,343	14,213	11,987	9,876	6,523	6,334	10,002	8,83
<b>Profundidade (10 a 20 cm) - 2014</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	11,3212*	56,9485*	8,97323*	4,92837 <sup>ns</sup>	7,2322 <sup>ns</sup>	2,9823 <sup>ns</sup>	11,2873 <sup>ns</sup>	456,234*
Adubação	5	934,7363*	702,343*	9129,736*	5872,1231*	13898,4531*	459,98327*	689,23223*	45,2304*
Resíduo	15	32,45234	7,3422	34,45234	17,893	45,234	6,7632	5,9734	789,233
Total	23								
Média geral		6,093	14,892	76,343	3,21	1,664	0,661	0,36	4,214
CV (%)		8,34	4,34	7,93	7,234	10,34	8,96	5,887	11,987
<b>Profundidade (20 a 40 cm) - 2014</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	8,342*	43,7236*	9,987 <sup>ns</sup>	6,2341*	9,8735*	6,263 <sup>ns</sup>	23,9087*	976,7893*
Adubação	5	676,9182*	349,876*	9675,123*	19,786*	10786,098*	1065,987*	321,8721*	87,7623*
Resíduo	15	56,3423	13,987	45,983	28,34123	76,9827	12,987	9,98263	321,987
Total	23								
Média geral		5,32	8,344	49,873	2,001	1,555	0,322	1,3003	1,782
CV (%)		6,45	6,234	13,87	4,9873	6,3423	8,9834	5,84	8,99

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

ANEXO C. Resumo da análise de variância do pH, fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e matéria orgânica (MO) do solo nas profundidades de 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm, no ano agrícola de 2015

<b>Profundidade (0 a 10 cm) - 2015</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	12,87*	76,342*	151,234 <sup>ns</sup>	13,3421*	9,234*	8,234 <sup>ns</sup>	13,234 <sup>ns</sup>	128,123 <sup>ns</sup>
Adubação	5	1023,347*	764,1235*	10043,2314*	8753,345*	7893,9873*	149,753*	687,372*	42,34569*
Resíduo	15	9,234	5,234	54,233	21,987	87,7236	9,343	6,348	321,0987
Total	23								
Média geral		5,342	19,873	98,645	4,3234	2,543	0,654	0,334	6,983
CV (%)		8,67	11,45	4,345	6,00	7,355	9,564	11,35	8,561
<b>Profundidade (10 a 20 cm) - 2015</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	14,344 <sup>ns</sup>	45,342*	7,342*	7,344 <sup>ns</sup>	5,234 <sup>ns</sup>	3,1239*	32,7983 <sup>ns</sup>	234,843*
Adubação	5	1093,34*	2898,3488*	1098,643*	4892,745*	8674,3841*	567,314*	452,340*	109,2360*
Resíduo	15	45,3437	13,56765	67,345	31,564	45,6764	10,456	6,454	134,456
Total	23								
Média geral		5,739	20,764	82,871	3,982	1,7340	0,623	0,389	6,004
CV (%)		4,94	10,34	7,234	5,343	4,345	9,345	4,3245	3,34
<b>Profundidade (20 a 40 cm) - 2015</b>									
FV	GL	Quadrado médio							
		pH	P	K	Na	Ca	Mg	Al	MO
Bloco	3	7,349 <sup>ns</sup>	103,983*	7,3411 <sup>ns</sup>	8,346 <sup>ns</sup>	9,453 <sup>ns</sup>	4,234*	8,312 <sup>ns</sup>	489,230*
Adubação	5	678,564*	1044,560*	787,764*	13,3423*	843,6543*	345,9867*	398,674*	65,23445*
Resíduo	15	26,749	7,438743	54,2349	45,7786	22,894	8,5656	11,760	87,9374
Total	23								
Média geral		5,324	8,983	56,398	2,213	1,783	0,662	0,438	3,762
CV (%)		3,87	7,34	13,3545	10,34	6,34	7,34	10,54	4,656

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

ANEXO D. Resumo da análise de variância dos teores foliares de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) e zinco (Zn)

FV	GL	Quadrado médio									
		N	P	K	S	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Zn
Bloco	3	10,95099 <sup>ns</sup>	2,360687 <sup>ns</sup>	2,624927 <sup>ns</sup>	0,95E-01 <sup>ns</sup>	2,901411 <sup>ns</sup>	0,8591000 <sup>ns</sup>	110,2299 <sup>ns</sup>	25,29130*	1116,282*	3,70433 <sup>ns</sup>
Adubação	5	622,2625*	178,7918*	1543,209*	231,7462*	171,9914*	299,7818*	20431,59*	207,1442*	72955,22*	5060,023*
Resíduo	15	11,86701	1,556098	20,49405	0,6669847	4,466038	0,8967375	226,5657	7,272417	694,1494	26,20078
Total	23										
Média geral		3,931	0,5007	2,4633	0,3143	11,318	0,427	13,561	17,415	170,75	76,687
CV (%)		12,5503	11,8833	11,45813	13,2752	9,4873	7,8598	5,3927	16,5461	8,5139	6,3592

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

ANEXO E. Resumo da análise de variância da massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produção de forragem (PF) por hectare

FV	GL	Quadrado médio		
		MFPA	MSPA	PF
Bloco	3	749,8833*	119,6611*	7,454533*
Adubação	5	402004,4*	45182,56*	6271,9201*
Resíduo	15	656,0083	83,92500	9,34582
Total	23			
Média geral		821,88	334,021	50,8913
CV (%)		13,8963	14,6382	14,129

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.

ANEXO F. Resumo da análise de variância do peso da espiga completa (PE) completa, peso gos grãos (PG) e rendimento de grãos (RG) por hectare

FV	GL	Quadrado médio		
		PE	PG	RG
Bloco	3	3,551367*	16,97066*	2,345424531 <sup>ns</sup>
Adubação	5	43822,45*	14722,20*	11,84983*
Resíduo	15	14,17898	3,431750	0,3444542
Total	23			
Média geral		330,839	241,85	10,89482
CV (%)		23,9384	7,9811	14,093

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste F; ns: não significativo.

Adubação: NPK, 50, 100, 150, 200 e 250 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. FV: fonte de variação. GL: grau de liberdade. CV: coeficiente de variação.