

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS - AGRONOMIA

**FONTES ALTERNATIVAS DE SUPLEMENTAÇÃO
POTÁSSICA PARA O MILHO: DINÂMICA NO SOLO,
TEOR NUTRICIONAL E ASPECTOS PRODUTIVOS DA
CULTURA**

Autor: Fernando Rodrigues Cabral Filho
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares

RIO VERDE - GO
Janeiro – 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS RIO VERDE PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**FONTES ALTERNATIVAS DE SUPLEMENTAÇÃO
POTÁSSICA PARA O MILHO: DINÂMICA NO SOLO,
TEOR NUTRICIONAL E ASPECTOS PRODUTIVOS DA
CULTURA**

Autor: Fernando Rodrigues Cabral Filho
Orientador: Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares
Coorientador: Marconi Batista Teixeira

Tese apresentada como parte das exigências para a obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde - GO
Janeiro – 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

CC117f Cabral Filho, Fernando Rodrigues
Fontes alternativas de suplementação potássica para o milho: dinâmica no solo, teor nutricional e aspectos produtivos da cultura / Fernando Rodrigues Cabral Filho; orientador Frederico Antonio Loureiro Soares; co-orientador Marconi Batista Teixeira. -- Rio Verde, 2024.
74 p.

Tese (Doutorado em Ciências Agrárias - Agronomia)
-- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2024.

1. Zea mays L.. 2. vinhaça concentrada. 3. cloreto de potássio. 4. polialita. 5. produção de grãos. I. Soares, Frederico Antonio Loureiro, orient. II. Teixeira, Marconi Batista, co-orient. III. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado) Artigo científico
 Dissertação (mestrado) Capítulo de livro
 Monografia (especialização) Livro
 TCC (graduação) Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

FERNANDO RODRIGUES CABRAL FILHO

Matrícula:

2019202320140030

Título do trabalho:

Fontes alternativas de suplementação potássica para o milho: dinâmica no solo, teor nutricional e aspectos produtivos da cultura

RESTRICÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 15/01/2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

RIO VERDE

Local

12/01/2024

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 89/2023 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**FONTES ALTERNATIVAS DE SUPLEMENTAÇÃO POTÁSSICA PARA O MILHO:
DINÂMICA NO SOLO, TEOR NUTRICIONAL E ASPECTOS PRODUTIVOS DA CULTURA.**

Autor: Fernando Rodrigues Cabral Filho

Orientador: Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia - Área de Concentração em
Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADA em, 01 de dezembro de 2023.

Prof. Dr. Frederico Antônio Loureiro Soares (Presidente)

Prof. Dr. Marconi Batista Teixeira (Avaliador interno)

Prof. Dr. João Alberto Lelis Neto (Avaliador externo)

Prof. Dr. Edson Cabral da Silva (Avaliador interno)

Prof. Dr. Christiano Lima Lobo de Andrade (Avaliador externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- João Alberto Lelis Neto, João Alberto Lelis Neto - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 24/01/2024 11:54:26.
- Christiano Lima Lobo de Andrade, Christiano Lima Lobo de Andrade - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 03/12/2023 17:05:07.
- Marconi Batista Teixeira, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - CCMDAGRO-R, em 01/12/2023 15:16:32.
- Edson Cabral da Silva, Edson Cabral da Silva - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 01/12/2023 14:01:25.
- Frederico Antonio Loureiro Soares, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 01/12/2023 12:09:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 551907
Código de Autenticação: 37970c1ff1



INSTITUTO FEDERAL GOIANO
Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
(64) 3624-1000

DEDICO

A DEUS,

Pela vida, saúde e força nos momentos de dificuldades.

OFEREÇO

À minha família,

À minha querida mãe, Liamar Azambuja da Silva, por todo amor e confiança que depositou em mim e, por apesar dos sacrifícios não desistir de apoiar à minha educação. Às minhas irmãs, Tatiane Silva Rodrigues Cabral e Juliana Silva Rodrigues Cabral, por estarem ao meu lado sempre que precisei. Em especial, à minha esposa Daniely Karen Matias Alves, por estar ao meu lado sempre que precisei desde o início desta caminhada, por todo carinho, atenção e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos, de maneira especial aos amigos e colegas do Laboratório de Hidráulica e Irrigação (grupo de pesquisa AGRICE) e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, pelos incentivos constantes, apoio e amizade dispensados ao longo de todo curso de pós-graduação, cuja contribuição através de discussões e troca de experiência foi de grande importância e relevância.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, todo pessoal envolvido (Diretoria, coordenação, secretaria etc.), ao IF Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade e suporte concedido para a realização desse curso de pós-graduação e pelo desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Sores e Dr. Marconi Batista Teixeira, por todo o apoio e orientação e ensinamentos ao longo da execução deste trabalho e sobretudo pela valiosa demonstração de amizade no decorrer desta caminhada.

Aos funcionários de todos Departamento da Instituição, pela atenção e colaboração nos momentos em que necessitei de auxílio para continuar nesta caminhada.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Centro de Excelência em Agricultura Exponencial (CEAGRE), pela concessão da bolsa de estudo, pelas verbas de auxílio financeiro ao projeto e fomento à pesquisa de maneira geral.

BIOGRAFIA DO AUTOR

FERNANDO RODRIGUES CABRAL FILHO, filho de Liamar Azambuja da Silva e Fernando Rodrigues Cabral, nasceu no dia 24 de junho de 1995, na cidade de Ituiutaba, Minas Gerais.

No mês de fevereiro de 2011, iniciou no curso de Técnico em Agropecuária no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, finalizando em dezembro de 2012.

Em fevereiro de 2013, ingressou no curso de Bacharelado em Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, graduando-se em agosto de 2017.

Em 2013, durante o curso superior ingressou na Iniciação Científica (IC) na área de Irrigação e Drenagem, como bolsista (PIBIC), sob a orientação dos Professores Dr. Marconi Batista Teixeira e Frederico Antonio Loureiro Soares, até a conclusão da graduação em 2017.

Em agosto de 2017, iniciou no curso de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde - GO, sob a orientação do Professor Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares, concluindo em agosto de 2019.

Em setembro de 2019, iniciou no curso de doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus de Rio Verde - GO, sob a orientação do Professor Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares, concluindo em dezembro de 2023.

ÍNDICE GERAL

| | |
|--|------------|
| ÍNDICE DE TABELAS | vii |
| ÍNDICE DE FIGURAS | ix |
| LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES | xi |
| RESUMO | 14 |
| ABSTRACT | 14 |
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 18 |
| 1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 21 |
| 2 OBJETIVOS | 24 |
| 2.1 Objetivo Geral..... | 24 |
| 2.2 Objetivos Específicos..... | 24 |
| 3 CAPÍTULO I | 25 |
| DINÂMICA DE POTÁSSIO E SÓDIO EM SOLOS DE CERRADO APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA CONCENTRADA | 25 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 26 |
| 3.2 MATERIAL E MÉTODOS | 28 |
| 3.2.1 Instalação do experimento..... | 28 |
| 3.2.2 Fontes de potássio | 30 |
| 3.2.3 Curva de eluição..... | 30 |
| 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 32 |
| 3.4 CONCLUSÕES | 41 |
| 3.5 BIBLIOGRAFIA CITADA | 41 |
| 4 CAPÍTULO II | 45 |
| ASPECTOS ECONÔMICOS E PRODUTIVOS DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA FERTIRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DE VINHAÇA CONCENTRADA | 45 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 46 |
| 4.2 MATERIAL E MÉTODOS | 47 |
| 4.2.1 Implantação do experimento..... | 47 |
| 4.2.2 Delineamento experimental | 49 |
| 4.2.3 Condução e aplicação dos tratamentos | 51 |
| 4.2.4 Variáveis analisadas | 52 |
| 4.2.4.1 Crescimento e acúmulo de matéria seca | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.4.2 Teor de potássio, variáveis produtivas e eficiência agrônômica | 52 |
| 4.2.4.3 Variáveis econômicas..... | 53 |
| 4.2.5 Análise estatística..... | 54 |
| 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 54 |
| 4.4 CONCLUSÕES | 69 |
| 4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 70 |

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO I - DINÂMICA DE POTÁSSIO E SÓDIO EM SOLOS DE CERRADO APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA CONCENTRADA

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabela 1. | Características químicas e granulométricas de amostras de solo, coletadas da camada de 0,0 a 0,2 m de um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo)..... | 29 |
| Tabela 2. | Valores médios das características das colunas preenchidas com Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo)..... | 29 |
| Tabela 3. | Valores do número de Peclet (P), fator de retardamento (R) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) do íon potássio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), para as fontes cloreto de potássio, Poly4 e vinhaça concentrada..... | 34 |
| Tabela 4. | Valores do número de Peclet (P), fator de retardamento (R) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) do íon sódio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), para as fontes cloreto de potássio, Poly4 e vinhaça concentrada..... | 37 |

CAPÍTULO II - ASPECTOS ECONÔMICOS E PRODUTIVOS DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA FERTIRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DE VINHAÇA CONCENTRADA

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabela 1. | Características físico-químicas do solo da área experimental, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, coletado antes da instalação do experimento..... | 49 |
| Tabela 2. | Descrição dos tratamentos utilizados..... | 50 |
| Tabela 3. | Resumo da análise de variância para o teor nutricional de potássio da planta de milho submetido a diferentes manejos de adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada..... | 55 |
| Tabela 4. | Resumo da análise de variância das variáveis de acúmulo de biomassa da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 56 |
| Tabela 5. | Resumo da análise de variância para o teor nutricional de potássio da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 57 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| Tabela 6. | Resumo da análise de variância para os parâmetros produtivos da espiga da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 58 |
| Tabela 7. | Resumo da análise de variância para a produtividade da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 59 |
| Tabela 8. | Contraste entre os tratamentos das médias do teor nutricional de potássio e parâmetros produtivos da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 61 |
| Tabela 9. | Análise econômica da cultura do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 66 |
| Tabela 10. | Análise econômica da cultura do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... | 65 |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I - DINÂMICA DE POTÁSSIO E SÓDIO EM SOLOS DE CERRADO APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA CONCENTRADA

- Figura 1.** Concentração relativa de potássio (C/Co) (1A e 1B) e sódio (1C e 1D) em função do número de volume de poros (NVP) no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (1A e 1C) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (1B e 1D), quando aplicada a água deionizada..... 33
- Figura 2.** Curva de eluição da concentração relativa de potássio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (A, C e E) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (B, D e F), para a fonte cloreto de potássio (A e B), Poly4 (C e D) e vinhaça (E e F)..... 36
- Figura 3.** Curva de eluição da concentração relativa de sódio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (A, C e E) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (B, D e F), para a fonte cloreto de potássio (A e B), Poly4 (C e D) e vinhaça (E e F)..... 39

CAPÍTULO II - ASPECTOS ECONÔMICOS E PRODUTIVOS DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA FERTIRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DE VINHAÇA CONCENTRADA

- Figura 1.** Caracterização do município de Rio Verde e do local do experimento (Milho segunda safra 2022/23)..... 48
- Figura 2.** Dados meteorológicos e a evapotranspiração da cultura do milho de segunda safra, no período decorrente do experimento, (Milho segunda safra 2022/23)..... 48
- Figura 3.** Croqui do experimento instalado em campo..... 51
- Figura 4.** Quantidades dos fertilizantes aplicados por tratamento..... 52
- Figura 5.** Altura de planta (AP - A) e número de folhas (NF - B) da planta de milho, cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 56
- Figura 6.** Número de espigas por planta de milho e massa de grãos por planta cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 59
- Figura 7.** Teor de potássio da folha do milho cultivada sob o uso isolado e associada à adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 62

- Figura 8.** Acúmulo de potássio na planta e extração total de K por hectare pela cultura do milho, cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 63
- Figura 9.** Produtividade de **grãos** do milho cultivados sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 63
- Figura 10.** Índice de eficiência agrônômica (IEA – kg de grãos-1 / kg de K₂O-1), eficiência agrônômica de potássio (EAK) e produtividade relativa (PRODRel - produtividade de Vinhaça / KCl – kg kg-1) da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)..... 65

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

| Símbolo / Sigla | Significado |
|------------------------------------|---|
| % | Porcentagem |
| dm ³ | Decímetro cúbico |
| °C | Graus Celsius |
| A | Área da seção transversal da coluna |
| AF | Área foliar |
| AIE | Altura de inserção da espiga |
| Al | Alumínio |
| AP | Altura de planta |
| B | Boro |
| C | Custo do tratamento |
| C/Co | Valores observados de concentração relativa |
| Ca | Cálcio |
| Ca ⁺² | Íon Cálcio |
| CE | Comprimento de espiga |
| cm | Centímetro |
| cm ² | Centímetro quadrado |
| cm ³ | Centímetro cúbico |
| CM _g | Custo marginal |
| cmol _c dm ⁻³ | Centimol de carga por decímetro cúbico |
| CP | Cloreto de potássio |
| CTC | Capacidade de troca catiônica |
| Cu | Cobre |
| CV | Coefficiente de variação |
| D | Coefficiente dispersivo-difusivo |
| DC | Diâmetro de colmo |
| DE | Diâmetro de espiga |
| DK | Dose aplicada de potássio por tratamento |
| Ds | Densidade do solo |
| EAK | Eficiência agronômica de potássio |
| Fe | Ferro |
| FV | Fonte de variação |
| g | Gramas |
| GL | Grau de liberdade |
| H | Hidrogênio |
| h | Hora |
| ha | Hectare |
| IEA | Índice de eficiência agronômica |
| IL | Índice de lucratividade |
| K | Potássio |
| K ⁺ | Íon potássio |
| KCl | Cloreto de potássio |
| kg | Quilograma |
| km | Quilômetros |
| L | Litros |
| LVdf | Latossolo Vermelho distroférico |
| m | Metros |
| m% | Saturação por alumínio |

| | |
|------------------------------------|--|
| M. O. | Matéria orgânica |
| m ³ | Metro cúbico |
| MB | Margem bruta |
| Mg | Magnésio |
| mg dm ⁻³ | Miligrama por decímetro cúbico |
| Mg ⁺² | Íon Magnésio |
| MGPlanta | Massa de grãos por planta |
| ml | Mililitros |
| mm | Milímetros |
| MMG | Massa de mil grãos |
| mmol _c dm ⁻³ | Milimol carga por decímetro cúbico |
| Mn | Manganês |
| MSC | Matéria seca do colmo |
| MSE | Massa seca da espiga |
| MSF | Matéria seca das folhas |
| Na | Sódio |
| NEP | Número de espigas por planta |
| NF | Número de folhas |
| NFG | Número de fileiras de grãos |
| NGF | Número de grãos por fileira |
| NGPlanta | Número de grãos por planta |
| NQo | Neossolo Quartzarênico Órtico típico |
| NVP | Número de volume de poros |
| P | Fósforo |
| P | Número de Peclet |
| Pe _q | Ponto de equilíbrio |
| P _g | Preço efetivamente recebido no mercado pelo grão |
| pH | Potencial de hidrogênio |
| PL | Poly4 |
| PROD | Produtividade de grãos |
| PROD _{kcl} | Produtividade de grãos com a utilização de Cloreto de potássio |
| PRODRel | Produtividade relativa |
| PROD _t | Produtividade de grãos por tratamento |
| PROD _{vc} | Produtividade de grãos com a utilização de Vinhaça concentrada |
| PT | Porosidade total |
| PVC | Policloreto de vinila |
| q | Fluxo |
| Q | Vazão |
| R | Fator de retardamento |
| R\$ | Reais |
| RB | Receita bruta |
| S | Enxofre |
| SB | Soma de bases |
| SCHA | Sacas por hectare |
| T | Intervalo de tempo para coletar o volume V _e |
| TFSA | Terra fina seca ao ar |
| V | Volume de solo da coluna |

| | |
|----|-----------------------------|
| V% | Saturação por bases |
| VC | Vinhaça concentrada |
| Ve | Volume de efluente coletado |
| Ve | Volume total de efluente |
| Vp | Volume de poros da coluna |
| Zn | Zinco |

RESUMO

CABRAL FILHO, F. R. **Fontes alternativas de suplementação potássica para o milho: dinâmica no solo, teor nutricional e aspectos produtivos da cultura.** 2024. 74p. Tese. Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brasil.

Com o aumento significativo da produção e produtividade, nestes últimos anos, a cultura do milho vem sofrendo mudanças tecnológicas relacionadas à melhoria na qualidade dos solos. Em relação à exigência nutricional, observa-se que a extração de potássio aumenta linearmente com o aumento de produtividade. Assim, objetivou-se com este estudo avaliar a dinâmica do potássio e sódio em solos de textura argilosa e arenosa, oriundo das fontes cloreto de potássio (KCl), vinhaça concentrada (VC) e polihalita (Poly4) em colunas de solo; avaliar o crescimento vegetativo, a produção de grãos, o teor nutricional de potássio na planta de milho, a eficiência agrônômica de diferentes manejos de potássio com cloreto de potássio e vinhaça concentrada. Avaliou-se também a viabilidade econômica das fontes VC e KCl, aplicadas de forma isolada ou associadas com e sem parcelamento das doses. O estudo compreendeu dois experimentos: o experimento I foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação juntamente ao Laboratório de Química do Solo, pertencentes ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brasil. Foram utilizados solos coletados da camada de 0,0 a 0,2 m de um Latossolo Vermelho distroférico, de textura argilosa e de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico. Foram utilizadas colunas de PVC rígido, sendo aplicadas as fontes: KCl, VC e Poly4. Foram coletadas amostras de lixiviado de 30 mL para a determinação da concentração de potássio e sódio. Utilizou-se o programa computacional DISP-1.1 para o cálculo dos parâmetros de transporte de solutos no solo: fator de retardamento, coeficiente dispersivo-difusivo e curva de eluição. O íon potássio foi retido com maior intensidade no Latossolo Vermelho distroférico, mostrando maior interação deste com o solo argiloso e teve maior lixiviação no Neossolo Quartzarênico, enquanto o sódio demonstrou maiores valores do fator de retardamento no Neossolo Quartzarênico. Para ambos os íons, a fonte vinhaça demonstrou menor lixiviação quando comparada com as fontes KCl e Poly4. O experimento II foi conduzido em condições de campo, na área experimental do IFGoiano, município de Rio Verde – GO. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, analisado em esquema de experimento simples, com quatro repetições, totalizando 20 parcelas experimentais, cujos tratamentos foram: T1 = KCl - 100% da dose de potássio recomendada, aplicada no estágio fenológico de V4 da cultura do milho; T2 = VC - 100% da dose de potássio recomendada aplicado no estágio fenológico de V4 na cultura do milho; T3 = VC+KCl - 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC aplicadas no estágio fenológico de V4 na cultura do milho; T4 - Vinhaça 2x 100% da dose de potássio aplicado via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 e V8 na cultura do milho; T5 = Vinhaça 2x + KCl 2x - 50% da dose de potássio aplicado via Cloreto de potássio e 50% via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 e V8 na cultura do milho. A suplementação associada de potássio, via cloreto de potássio e vinhaça concentrada não beneficia a produtividade de grãos de milho, sendo recomendado a utilização isolada de apenas cloreto de potássio ou de vinhaça concentrada. A utilização de 100% do potássio via vinhaça concentrada proporciona a maior eficiência agrônômica do nutriente.

Palavras-chave: *Zea mays* L., vinhaça concentrada, cloreto de potássio, polihalita, produção de grãos, eficiência agrônômica.

ABSTRACT

CABRAL FILHO, F. R. **Alternative sources of potassium supplementation for corn: soil dynamics, nutritional content and productive aspects of the crop.** 2023. 74p. Thesis (Doctorate in Agricultural Sciences – Agronomy. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, Brazil.

With the significant increase in production and productivity in recent years, corn cultivation has been undergoing technological changes related to improvements in soil quality. Regarding nutritional requirements, it is observed that potassium absorption increases linearly with the increase in productivity. Thus, the goal of this study was to evaluate the potassium dynamics in the soil supplied by potassium chloride, concentrated vinasse, and polyhalite as well as the vegetative growth, grain production, nutritional potassium content in the corn plant, and the agronomic efficiency of the different potassium managements with potassium chloride and concentrated vinasse. Two experiments were carried out. Experiment 1: The experiment was set in the Hydraulics and Irrigation laboratory together with the Soil Chemistry laboratory, belonging to the Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brazil. A distroferric Red Latosol, with clay texture, and a typical Ortíc Quartzarenic Neosol were used. Rigid PVC columns were used, with the following potassium sources: potassium chloride, vinasse, and Poly4. To determine the potassium and sodium content, samples with 30 mL of effluent were collected. The DISP-1.1 software was used to calculate the solute transport parameters in the soil: retardation factor, dispersive-diffusive coefficient, and elution curve. The potassium ion was retained with higher intensity in the distroferric Red Latosol, showing higher interaction with the clayey soil and had greater leaching in the Quartzarenic Neosol, while sodium demonstrated higher retardation factor values in the Quartzarenic Neosol. For both ions, the vinasse source demonstrated less leaching when compared to the potassium chloride and Poly4 sources; Experiment 2: The test was conducted in an experimental field in the city of Rio Verde – GO. The experimental design used was randomized blocks, analyzed in a simple experiment scheme, with 4 replications, totaling 20 experimental plots. Treatment 1 = KCl - 100% of the potassium dose applied via potassium chloride at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 2 = Vinasse - 100% of the dose of potassium applied via concentrated vinasse at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 3 = Vinasse + KCl - 50% of the dose of potassium applied via Potassium Chloride and 50% via concentrated vinasse at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 4 - Vinasse 2x 100% of the dose of potassium applied via concentrated vinasse at the phenological stage of V4 and V8 in the corn crop; Treatment 5 = Vinasse 2x + KCl 2x - 50% of the dose of potassium applied via Potassium Chloride and 50% via concentrated vinasse at the phenological stage of V4 and V8 in the corn crop. Mixed potassium supplementation via potassium chloride and concentrated vinasse does not benefit the corn grain productivity, and the isolated use of potassium chloride or concentrated vinasse is recommended. The use of 100% potassium via concentrated vinasse provides the greatest nutrient agronomic efficiency.

Keywords: *Zea mays* L., concentrated vinasse, potassium chloride, grain production, agronomic efficiency.

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a cultura do milho apresenta cadeia produtiva de grande importância econômica no cenário do agronegócio (ABREU, 2019). A produção e comercialização de milho são expressivas no mundo, pela grande importância da utilização de seus grãos em diversos segmentos industriais, como fonte de alimento, fibras, combustível e rações (NARDINO *et al.*, 2017).

Com o desenvolvimento de tecnologias de melhorias na fertilidade dos solos da região do Cerrado brasileiro, a produção em larga escala de milho tornou-se rentável (MATOS; PESSÔA, 2014). Os solos da região Centro-Oeste do Brasil geralmente são altamente intemperizados, com predominância de Latossolos com baixa fertilidade natural, demandando a utilização de altas doses de corretivos e fertilizantes, principalmente a adubação potássica, fazendo com que sejam importante componente no custo de produção (SILVA *et al.*, 2016).

O potássio (K) é um macronutriente primário fundamental no desenvolvimento das plantas, com relevantes funções fisiológicas e metabólicas, translocação de assimilados e de carboidratos e, aprimora a eficiência do uso da água, cujo suprimento balanceado de potássio potencializa a utilização do nitrogênio (FOLONI *et al.*, 2013; FURLANETTO *et al.*, 2017). Entre os nutrientes essenciais para o crescimento e desenvolvimento da planta de milho, o íon potássio (K^+) é o mais abundante no solo, e o segundo elemento absorvido em maiores quantidades pela planta de milho, quando comparado com outros elementos, sendo que em média 30% do potássio absorvido pela planta são exportados para os grãos.

O Brasil é responsável por cerca de 8% do consumo global de fertilizantes, ocupando a quarta posição, atrás apenas da China, Índia e dos Estados Unidos. Soja, milho e cana-de-açúcar respondem por mais de 73% do consumo de fertilizantes no País (MAPA, 2023). A Associação Nacional para a Difusão de Adubos (Anda) revelou que mais de 70% dos fertilizantes usados na agricultura brasileira são importados, sendo as maiores dependências externas do país o cloreto de potássio (95%), nitrogênio (80%) e fosfato (60%). O desembolso passou de US\$ 8,59 bilhões, em 2018, para US\$ 24,76 bilhões em 2022 (ANDA, 2023).

O Canadá e Rússia são os principais produtores de potássio, cujas principais fontes são: cloreto de potássio (KCl) – 58 a 60% de K_2O ; sulfato de potássio (K_2SO_4) – 48 a 53% de K_2O ; sulfato de potássio e magnésio ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$) – 21-22% de K_2O ; e nitrato de potássio (KNO_3) ou salitre potássico – 44-46% de K_2O (REETZ, 2017). Isso

justifica a busca de fontes alternativas de potássio, sobretudo que promovam a reciclagem desse e de outros nutrientes de plantas.

O cloreto de potássio tem se destacado como principal produto de importação no Brasil, em função da alta concentração de K_2O , ocasionando em menor custo por unidade de potássio (YAMADA; ROBERTS, 2005), porém, após a aplicação desse fertilizante podem ocorrer perdas por lixiviação de K no perfil do solo, na ordem de 50-70% (WU; LIU, 2008).

Além disso, o excesso de K interfere positiva ou negativamente na absorção de outros cátions pelas plantas. A absorção de um íon afeta a de outro íon, quando competem pelo mesmo sítio do carregador (MEURER, 2006). Sabe-se também, que as fontes de K fertilizante comerciais são finitas e o desenvolvimento de novas fontes de K estão em andamento (BASAK *et al.*, 2017; OOSTERHUIS *et al.*, 2014).

A associação de adubos orgânicos com mineral, tem aumentado os rendimentos de milho e a disponibilidade de K e P (HENTZ *et al.*, 2016). Assim, o aproveitamento de resíduos orgânicos agroindustriais como fonte de fertilizante corresponde uma alternativa para a adubação de pastagens e culturas agrícolas, com a vantagem de promover a reciclagem de nutrientes e dar destinação sustentável para os resíduos agroindustriais.

A vinhaça de cana-de-açúcar, gerada a partir da produção do etanol, é um resíduo com potencial de aproveitamento na suplementação nutricional da cultura do milho e outras culturas. Estima-se que para cada litro de etanol produzido, são gerados cerca de 10 a 14 litros de vinhaça (MAPA, 2007; SILVA *et al.*, 2014). Para evitar o descarte na natureza, vários pesquisadores têm-se interessado pela aplicação de vinhaça em culturas, visto que a mesma além de fornecer nutrientes pode ser uma fonte alternativa de água para complementar o déficit hídrico (SILVA, 2009).

O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica (basicamente na forma de ácidos orgânicos) e, em menor quantidade, são cátions como o K^+ , Ca^{+2} e Mg^{+2} (RIBEIRO *et al.*, 2014). Assim, dentre as vantagens de utilização da vinhaça, destaca-se o fornecimento de potássio, que corresponde cerca de 20% do total de compostos orgânicos e minerais (MARQUES, 2006), além de nitrogênio, cálcio, magnésio e fósforo presentes em menores concentrações (SEIXAS *et al.*, 2016), contribuindo para minimizar o uso de água com melhor qualidade na agricultura (SILVA *et al.*, 2019).

A utilização da vinhaça como fertilizante possui boa aceitação sob o ponto de vista agrícola, pelo baixo investimento inicial requerido, baixo custo de manutenção à rápida

disposição, ganhos compatíveis com o investimento e baixa dependência de tecnologia complexa.

No entanto, quando a vinhaça é aplicada sem critérios técnicos, pode causar efeitos indesejáveis, como comprometer a qualidade da safra produzida, além de promover alterações na composição química, atributos físicos e microbiológicos do solo (LAMAISON *et al.*, 2015), visto que esse resíduo possibilita o aumento da concentração salina do solo, podendo alterar o pH e teores de potássio trocáveis (SILVA *et al.*, 2014).

Dessa forma, devem-se mensurar as dosagens de acordo com as características intrínsecas de cada solo, uma vez que este possui quantidades desbalanceadas de elementos minerais e orgânicos, podendo ocorrer lixiviação de vários desses íons, principalmente do íon nitrato e íon potássio (SILVA *et al.*, 2007).

Em função dos grandes volumes de vinhaça produzidos diariamente e com o objetivo reduzir o custo de transporte desse subproduto até a lavoura, surgiram os sistemas de concentração de vinhaça, baseados na evaporação em múltiplos estágios, com evaporadores em nevoa turbulenta descendente, dotados de aquecimento e evaporação rápidos e uniformes, em sistema de cascata (POSSIGNOLO *et al.*, 2015). A concentração da vinhaça visa reduzir a quantidade de água presente neste resíduo, reduzindo o volume e consequentemente os custos com transporte e aplicação na fertirrigação (SOUSA, 2018).

O processo de concentração da vinhaça é uma das soluções viáveis para transportar esse resíduo a distâncias entre 40 e 100 km com economicidade. De acordo com Carvalho e Silva (2010), cerca de 80% da água presente na vinhaça pode ser recuperada, sendo que somente o Brasil produz 351 bilhões de litros de vinhaça *in natura* por ano, demonstrando o potencial de reutilização da água que se pode alcançar (CONAB, 2017).

Neste sentido, a utilização da vinhaça concentrada em substituição às fontes minerais de potássio ou em forma de complementação da adubação na cultura do milho, possui aspectos agronômicos, ambientais e econômicos viáveis, demandando estudos que visam analisar o comportamento da vinhaça concentrada em solos de cerrado, no sistema de plantio direto com culturas de grãos, frente as fontes convencionais; seus efeitos agronômicos na planta de milho e, a viabilidade econômica do processo de fertirrigação frente ao incremento produtivo observado.

1.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P.A.S. **Irrigação por sulcos com efluente de fossa séptica biodigestora como fonte de nitrogênio na cultura do milho**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônomicas) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2019.

Associação Nacional para a Difusão de Adubos (**ANDA**). 2023. Disponível em: <https://anda.org.br/arquivos/>

BASAK, B.B.; SARKAR, B.; BISWAS, D.R.; SARKAR, S.; SANDERSON, P.; NAIDU, R. **Bio-intervention of naturally occurring silicate minerals for alternative source of potassium: challenges and opportunities**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2016.10.016>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2022.

CARVALHO, T.C.; SILVA, C.L. Redução da quantidade de vinhaça através da evaporação. **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, p. 1-17, 2010.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: aquisições de água sanitária em 2016 e 2017 – tabela 22**. Disponível em: [Conab - Página inicial](#) Acesso em: 16 de fevereiro de 2022.

FOLONI, J. S. S.; CORTE, A. J.; CORTE, J. R. N.; et al., Adubação de cobertura na batata-doce com doses combinadas de nitrogênio e potássio. **Revista Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 117-126, 2013.

FURLANETTO, R. H. Comportamento espectral do milho em diferentes condições de fertilidade de potássio no solo. In: **ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA**, 1, 2017, Maringá, Anais... Encontro Internacional De Produção Científica, 2017. p.1 – 5.

HENTZ P, CORRÊA JC, FONTANELI RS, REBELATTO A, NICOLOSO RS, SEMMELMANN C. Poultry Litter and Pig slurry Applications in an Integrated Crop-Livestock System. **Revista Brasileira Ciências Solo**. 2016.

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.

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

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (**MAPA**). 2023. Disponível em: Plano Nacional de Fertilizantes — Ministério da Agricultura e Pecuária (www.gov.br) <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos->

agricolas/fertilizantes/plano-nacional-de-fertilizantes/#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20respons%C3%A1vel%20por%20cerca%20de%208%25,de%2073%25%20do%20consumo%20de%20fertilizantes%20no%20Pa%C3%ADs.

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: Segato, S.V.; Pinto, A.S.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editorial 2006. p.369-375.

MATOS, P. F.; PESSÔA, V. L. S. A apropriação do cerrado pelo agronegócio e os novos usos do território. Campo-território: **Revista de geografia agrária**, v. 9, n. 17, p. 6-26, abr., 2014.

MEURER, E.J. Potássio. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas: 2006**. Viçosa: SBCS, cap. 11, p.282-295.

NARDINO, M. Divergência genética entre genótipos de milho (*Zea mays* L.) em ambientes distintos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 164-174, 2017.

OOSTERHUIS, D.M.; LOKA, D.A.; KAWAKAMI, E.M.; PETTIGREW, W.T. **The physiology of potassium in crop production, advances in agronomy. elsevier**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800132-5.00003-1>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2022.

POSSIGNOLO, N.V. Caracterização da vinhaça in natura e concentrada para viabilização da mistura de fontes nitrogenadas. **Ciência & Inovação**, v.2, n.1, p.29 – 30, 2018.

REETZ, H.F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: Anda, 2017.

RIBEIRO, P.H.P; LELIS NETO, J.A.; TEIXEIRA, M.B.; GUERRA, H.O.C.; SILVA, N.F.; CUNHA, F. N. Distribuição de potássio aplicado via vinhaça em Latossolo vermelho amarelo e Nitossolo vermelho. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.8, p.403 – 410, 2014.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 39, n.2, p.172-179, 2016.

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

SILVA, A. D.; MENEZES, C. C. E.; MENEZES, J. F. S.; NASCIMENTO, W. P. Fontes e doses de magnésio na cultura do milho. **Gl. Sci Technol**, Rio Verde, v.09, n.03, p.20 - 30, set/dez. 2016.

SILVA, A.; RUIZ, J. G. C. L.; VIANA, L. M.; VIANA, L. M. Resposta da cultura do milho à aplicação de vinhaça como fonte de potássio. **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v. 14, n. 1, p.40-46, 2019.

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, 2014.

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**, Campina Grande, v.11, n.1, p. 108-114, 2007.

SILVA, V. L. **Estudo econômico das diferentes formas de transporte de vinhaça em fertirrigação na cana-de-açúcar**. 2009. 54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

SOUSA, V. G. **Alternativas para valorização da vinhaça**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, 2018.

WU, L.; LIU, M. Preparation and properties of chitosan coated NPK compound fertilizer with controlled-release and water-retention. **Carbohydrate Polymers**, v. 72, n. 2, p. 240-247, 2008.

YAMADA, T. e ROBERTS, T. L. **Potássio na agricultura brasileira**. Jaboticabal: Potafos, 2005.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Objetivou-se com este estudo avaliar a dinâmica de potássio no solo e, o desenvolvimento vegetativo, a produção de grãos, além do balanço nutricional de potássio na planta de milho, submetidos à fertirrigação com vinhaça concentrada e cloreto de potássio, isolados e associados, com e sem parcelamento.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a dinâmica dos íons potássio e sódio presentes nas fontes cloreto de potássio, vinhaça e Poly4 (polihalita) ao longo do perfil superficial de um Latossolo Vermelho distroférico e um Neossolo Quartzarênico Órtico típico, em laboratório;
- Avaliar os aspectos morfológicos do milho através da mensuração de variáveis como altura de planta, diâmetro de colmo, número de folhas, área foliar e acúmulo de matéria seca, em resposta à fertirrigação com vinhaça concentrada e cloreto de potássio sob uso isolado e associado, com e sem parcelamento da dose;
- Avaliar o teor nutricional de potássio na folha do milho, submetido à fertirrigação com vinhaça concentrada e cloreto de potássio sob uso isolado e associado, com e sem parcelamento da dose;
- Avaliar os efeitos da fertirrigação com vinhaça concentrada e cloreto de potássio em diferentes manejos na produção de matéria seca e de grãos do milho;
- Avaliar a viabilidade agrônômica da utilização da vinhaça concentrada de cana-de-açúcar na cultura do milho, como forma de suplementação da necessidade nutricional de potássio e outros nutrientes.

3 CAPÍTULO I

DINÂMICA DE POTÁSSIO E SÓDIO EM SOLOS DE CERRADO APÓS A APLICAÇÃO DE VINHAÇA CONCENTRADA

Resumo: Solos com baixa fertilidade natural aliados ao alto consumo de potássio na agricultura, acarretam a procura pela utilização de diferentes fontes minerais e orgânicas, como alternativas para suprir a necessidade das culturas. Partindo da hipótese de que dependendo da fonte de potássio aplicada no solo arenoso pode-se potencializar a perda de nutrientes no perfil do solo do Cerrado, e que há diferenças na dinâmica e teores das bases dependendo da fonte utilizada, objetivou-se com este estudo evidenciar o comportamento do potássio e sódio presentes nas fontes cloreto de potássio, vinhaça concentrada e (Poly4) ao longo do perfil superficial de um Latossolo Vermelho distroférico e de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico. O experimento foi conduzido no Laboratório de Hidráulica e Irrigação juntamente ao Laboratório de Química do Solo, pertencentes ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brasil. Foram utilizados um Latossolo Vermelho distroférico, de textura argilosa e um Neossolo Quartzarênico Órtico típico. Foram utilizadas colunas de PVC rígido, sendo aplicadas as fontes: cloreto de potássio, vinhaça e Poly4. Foram coletadas amostras de solução de 30 mL para as determinações de potássio e sódio. Utilizou-se o programa computacional DISP-1.1 para cálculo dos parâmetros de transporte de solutos no solo: fator de retardamento, coeficiente dispersivo-difusivo e curva de eluição. O íon potássio foi retido com maior intensidade no Latossolo Vermelho distroférico, mostrando maior interação com o solo argiloso, e teve maior lixiviação no Neossolo Quartzarênico; enquanto o sódio demonstrou maiores valores do fator de retardamento no Neossolo Quartzarênico. Para ambos os íons, a fonte vinhaça demonstrou menor lixiviação quando comparada com as fontes cloreto de potássio e Poly4.

Palavras-chave: Latossolo, Neossolo, vinhaça, cloreto de potássio, polihalita.

Abstract: Soils with low natural fertility combined with high potassium consumption in agriculture, result in a demand for different mineral and organic sources. Based on the hypothesis that depending of the potassium source applied to sandy soil, the nutrients loss in the Cerrado soil profile can be increased, and that there are differences in the dynamics and levels of exchangeable bases depending of the source used, this study aimed to highlight the behavior of potassium and sodium present in the sources of potassium chloride, vinasse and Poly4 (polyhalite) along the surface profile of a distroferric Red Latosol and a typical Ortic Quartzarenic Neosol. The experiment was carried out in the Hydraulics and Irrigation laboratory together with the Soil Chemistry laboratory, belonging to the Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brazil. A distroferric Red Latosol, with clay texture, and a typical Ortic Quartzarenic Neosol were used. Rigid PVC columns were used, using the following sources: potassium chloride, vinasse, and Poly4. To determine the potassium and sodium content, samples with 30 mL of effluent were collected. The DISP-1.1 software was used to calculate the solute transport parameters in the soil: retardation factor, dispersive-diffusive coefficient, and elution curve. The potassium ion was retained with higher intensity in the distroferric Red Latosol, showing higher interaction with the clayey soil and had greater leaching in the

Quartzarenic Neosol, while sodium demonstrated higher retardation factor values in the Quartzarenic Neosol. For both ions, the vinasse source demonstrated less leaching when compared to the potassium chloride and Poly4 sources.

Keywords: Latosol, Neosol, vinasse, potassium chloride, polyhalite.

3.1 INTRODUÇÃO

Em grande parte da região Centro-Oeste do Brasil os solos são altamente intemperizados, com predominância de Latossolos com baixa fertilidade natural, demandando a utilização de elevadas quantidades de corretivos e de fertilizantes, principalmente fosfatados e potássicos, tornando-os importantes componentes no custo de produção (SILVA *et al.*, 2016). Normalmente, os teores naturais do íon potássio (K^+) encontrados nos solos tropicais (Latosolos e Neossolos) são considerados baixos ($< 1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (BENITES *et al.*, 2010).

O potássio (K) é o segundo nutriente mais absorvido pelas plantas (VILELA *et al.*, 2004; PARENTE *et al.*, 2016), sendo essencial na ativação de diversas enzimas no metabolismo das plantas, abertura e fechamento estomático, respiração, transpiração, fotossíntese, formação de carboidratos, controle de turgidez do tecido, dentre outras funções (TAIZ *et al.*, 2017).

Sua forma predominante no solo é a catiônica (K^+) e seus sais possuem alta solubilidade, favorecendo a ocorrência de efeitos deletérios ao crescimento e desenvolvimento das plantas pelo potencial salino e, também grandes perdas por lixiviação, dependendo do manejo e doses adotadas (BERNARDI *et al.*, 2009; LEAL *et al.*, 2015). Solos que apresentam capacidade de troca catiônica (CTC) baixa, principalmente com textura arenosa, como no caso dos Neossolos Quartzarênico, favorecem a ocorrência de perdas de K^+ por lixiviação (WERLE *et al.*, 2008).

Outro fator que afeta a capacidade salina e a movimentação do K no solo está relacionada ao fertilizante utilizado. O cloreto de potássio (KCl) é a principal fonte mineral utilizada no Brasil, sendo a mais economicamente viável (SILVA *et al.*, 2016). Por ser um sal altamente solúvel, agrava os efeitos deletérios citados, dependendo do manejo adotado (VILELA *et al.*, 2004; RESENDE *et al.*, 2006). Outras fontes de potássio são utilizadas em diversas culturas, sejam elas orgânicas ou minerais, o que pode amenizar esses problemas.

A polihalita é um mineral ainda pouco utilizado como fertilizante, com concentrações médias de 14% de K_2O , 17% de CaO , 6% de MgO e 19% de S (MELLO

et al., 2018). Segundo Silva (2019), após a descoberta de depósitos mais abundantes, o uso da polihalita como fertilizante multinutriente tem se difundido cada vez mais, e pode ser explorado como fonte de potássio, cálcio, magnésio e enxofre, apresentando-se como uma opção relevante para a adubação potássica, quando se considera o fato de as fontes de potássio serem minerais e finitas.

A utilização da polihalita tem sido avaliada em diversas culturas, como o trigo, batata, tomate e soja (SILVA, 2019), e são observados resultados semelhantes ou superiores ao uso de cloreto de potássio. Contudo, poucos estudos evidenciam a dinâmica da utilização desta fonte em solos com diferentes características físico-químicas.

Na cultura da cana-de-açúcar, a vinhaça é a principal fonte de potássio, cuja aplicação ocorre, principalmente na forma de fertirrigação, sendo que para cada litro de etanol produzido são gerados de 10 a 15 litros de vinhaça (CABRAL FILHO *et al.*, 2018). O constituinte principal da vinhaça é a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, por cátions como o K^+ que corresponde a 20% dos compostos orgânicos e minerais, cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) (MARQUES, 2006; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Quando aplicada no solo, a vinhaça pode promover melhoria da fertilidade; porém, quando usada para este fim, as quantidades não devem ultrapassar a capacidade de retenção de íons, uma vez que o solo possui quantidades desbalanceadas de elementos minerais e orgânicos, podendo ocasionar desequilíbrio de nutrientes e no potencial osmótico do solo, influenciar de forma negativa na condutividade hidráulica e pH, acarretando na lixiviações e escoamento superficial de íons catiônicos para águas subterrâneas e superficiais (ALVES *et al.*, 2015; CHRISTOFOLETTI *et al.*, 2013; RIBEIRO *et al.*, 2010). Atualmente, a CETESB (2006) possui em vigor uma legislação sobre o Plano de Aplicação de Vinhaça para enriquecimento do solo agrícola, deverá ser calculada considerando a profundidade e a fertilidade do solo, a concentração de potássio na vinhaça e a extração média desse elemento pela cultura.

A capacidade do solo em reter o potássio aplicado depende da capacidade de troca catiônica do solo (CTC), sendo assim, as quantidades de matéria orgânica e argila são influenciadoras no grau de lixiviação. Solos com alta CTC possuem grande capacidade em reter o potássio aplicado, entretanto, a lavagem deste elemento é um problema frequente em solos arenosos (LIBARDI, 2005).

Conforme ressalta Silva *et al.* (2012), modelos de simulação podem proporcionar melhor entendimento dos processos de deslocamento de solutos no solo, constituindo em ferramentas aplicáveis a estudos de minimização de impactos ambientais. O sucesso da simulação e resolução das equações que predizem o deslocamento de solutos no solo é necessário à determinação dos parâmetros de transporte que influenciam na relação solo-soluto. De acordo com Matos *et al.* (2013), a avaliação da mobilidade dos íons no solo pode ser realizada através de técnicas baseadas em deslocamento de fluidos miscíveis e recursos computacionais, como o programa computacional DISP-1.1, desenvolvido por Borges Júnior e Ferreira (2006).

Partindo da hipótese de que a fonte de potássio aplicada no solo arenoso pode potencializar a perda de nutrientes no perfil do solo do Cerrado e que há diferenças na dinâmica e teores das bases, objetivou-se com este estudo evidenciar o comportamento dos íons potássio e sódio presentes nas fontes cloreto de potássio, vinhaça concentrada e polihalita (Poly4) ao longo do perfil superficial de um Latossolo Vermelho distroférico, argiloso e de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Instalação do experimento

O experimento foi conduzido nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação e de Química do Solo, pertencentes ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, Brasil. Foram utilizados dois tipos de solos, o primeiro (Solo A) foi coletado em área de Fazenda experimental pertencente ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), de textura argilosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS *et al.*, 2018) e, com classificação correlata na Soil Taxonomy (USDA, 1999) Rhodic Haplustox (Oxisols) e, na WRB/FAO (2015) Ferralsols.

O segundo solo (Solo B), foi classificado como Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (SANTOS *et al.*, 2018) e, com classificação correlata na Soil Taxonomy (1999) Entisols (Quartzipsamments) e, na WRB/FAO (2015) Arenosols.

Foram coletadas amostras deformadas de cada solo nas camadas de 0,0-0,2 m de profundidade. Inicialmente foram determinados os parâmetros físicos e químicos dos

solos, conforme metodologias descritas por Teixeira *et al.* (2017) (Embrapa) (Tabela 1), para posterior preenchimento das colunas de solo.

Tabela 1. Características químicas e granulométricas de amostras de solo, coletadas da camada de 0,0 a 0,2 m de um Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo).

| Solo | Ca | Mg | Al | H+Al | K | K | P | CaCl ₂ |
|------|--|-------|-------|--------------------|--|-----------------|-----------------|-------------------|
| | ----- cmol _c dm ⁻³ ----- | | | | --- mg dm ⁻³ --- | | | pH |
| LVdf | 2,00 | 0,80 | 0,05 | 6,9 | 0,08 | 31 | 1,8 | 4,76 |
| NQo | 1,71 | 0,64 | 0,04 | 1,64 | 0,03 | 10 | 21,38 | 5,1 |
| | Textura (g kg ⁻¹) | | | M.O. ^a | CTC ^b | SB ^c | V% ^d | m% ^e |
| | Argila | Silte | Areia | g dm ⁻³ | --- cmol _c dm ⁻³ --- | Sat. Bases | Sat. Al | |
| LVdf | 600 | 100 | 300 | 44,4 | 9,8 | 2,9 | 29 | 1,7 |
| NQo | 110 | 20 | 870 | 14,5 | 4,02 | 2,38 | 59,2 | 1,7 |

P (Fósforo) e K (Potássio): Melich 1; Ca (Cálcio), Mg (magnésio) e Al (Alumínio): KCl 1 mol L⁻¹; M.O. (Matéria orgânica): Método colorimétrico.

^aMatéria orgânica; ^bCapacidade de troca cationica; ^csoma de bases; ^dsaturação de bases; ^esaturação de alumínio.

As amostras das duas classes de solos foram levadas ao laboratório, destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm e preparadas utilizando a metodologia TFSA (terra fina seca ao ar). Foram utilizadas colunas de policloreto de vinil (PVC) rígido, com as dimensões de 0,25 m de altura e 0,07 m de diâmetro. Sendo estas preenchidas até a altura de 0,2 m, resultando em volume de solo de 805,28 cm³. O preenchimento das colunas foi realizado de forma a manter a densidade do solo o mais próximo do encontrado a campo, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios das características das colunas preenchidas com Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo).

| Coluna ^a | Solo (g) | Ds ^b (g cm ⁻³) |
|---------------------|----------|---------------------------------------|
| 1A | 929,50 | 1,15 |
| 1B | 1274,07 | 1,58 |
| 2A | 949,45 | 1,18 |
| 2B | 1304,46 | 1,62 |

| | | |
|----|---------|------|
| 3A | 959,03 | 1,19 |
| 3B | 1242,40 | 1,54 |
| 4A | 946,67 | 1,18 |
| 4B | 1289,99 | 1,60 |
| 5A | 948,13 | 1,18 |
| 5B | 1280,12 | 1,59 |
| 6A | 954,93 | 1,19 |
| 6B | 1321,92 | 1,64 |
| 7A | 929,40 | 1,15 |
| 7B | 1326,77 | 1,65 |

^a1: Água deionizada; 2 e 3: Cloreto de potássio; 4 e 5: Poly4; 6 e 7: Vinhaça. A: Latossolo; B: Neossolo.
^bDs – densidade do solo.

Foram aplicados nesses solos três fontes de potássio: Cloreto de potássio (KCl) (colunas 2 e 3), Poly4 (PL) (colunas 4 e 5) e Vinhaça concentrada (VC) (colunas 6 e 7), sendo, duas repetições (duas colunas de solo), além de um tratamento apenas com água deionizada (coluna 1). Todas as fontes foram diluídas a uma concentração de 2,7 g de potássio por litro, com o intuito de padronizar a concentração de potássio já presente na vinhaça concentrada.

3.2.2 Fontes de potássio

A vinhaça utilizada no experimento foi proveniente da usina Raízen – Unidade Jataí, com concentração de 27 g L⁻¹ de potássio. A coleta foi realizada na unidade de saída, após passagem pela produção e sistema de resfriamento, mas antes de ser destinada aos canais de transporte no campo, evitando a contaminação ou adição de partículas de solo. O cloreto de potássio utilizado foi o granulado vermelho, com teor de potássio de 60%, e o Poly4 (Polihalita) fornecido pela empresa Cibra Fertilizantes, granulado branco, com 14% de K₂O; 19% S; 3,6% Mg, e 12,1% Ca.

3.2.3 Curva de eluição

Anterior ao início do teste, as colunas de solo foram lentamente saturadas com água deionizada pelo processo de capilaridade, utilizando um recipiente plástico. Para tanto, as colunas foram dispostas de forma inclinada, preenchidas com água destilada até 2/3 da altura e mantidas em repouso por 48 horas, para completar a saturação por

capilaridade. Após esse período, as colunas foram fixadas em um suporte metálico, sendo instalado acima delas o reservatório de efluente contendo água destilada. Em seguida, iniciou-se o teste com a lavagem do solo pelo período de quatro horas para retirada dos nutrientes presentes. Substituiu-se o fornecimento de água destilada pelas fontes de potássio, iniciando a partir desse ponto a cronometragem do tempo e a coleta manual dos volumes da solução, após percorrer a coluna de solo.

Os volumes coletados foram de 30 mL, definidos em função do volume total de poros (assumida em termos gerais a cerca de 50%) e da quantidade necessária para serem realizadas as análises dos componentes químicos. Dessa forma, cada frasco representou aproximadamente 0,05 volumes de poros (em relação ao volume total da coluna preenchida com solo), proporcionando bom refinamento para a elaboração das curvas de eluição. O volume total de solução coletado variou de 1,80 a 3,60 número de volume de poros (NVP) (Equação 1).

$$NVP = \frac{V_e}{V_p} \quad (1)$$

Em que:

NVP – número de volume de poros, adimensional;

V_e – volume de solução coletado, m^3 ;

V_p – volume de poros da coluna, m^3 .

O volume de poros e o fluxo de água e solutos de cada coluna foi calculado utilizando as Equações 2 e 3.

$$V_p = PT \times V \quad (2)$$

Em que:

V_p – volume de poros, m^3 ;

PT – porosidade total, $m^3 m^{-3}$;

V – volume de solo da coluna, m^3 .

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{V_e}{V_t} \quad (3)$$

Em que:

- q – fluxo, cm h^{-1} ;
Q – vazão, $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$;
A – área da seção transversal da coluna, cm^2 ;
Ve – volume total de solução, cm^3 ;
T – intervalo de tempo para coletar o volume Ve.

Após a coleta, as amostras foram submetidas à análise no Laboratório de Química do Solo, do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Goiás, utilizando o fotômetro de chamas para a determinação do potássio (K) e sódio (Na).

Por último, foi utilizado o programa computacional DISP-1.1 para o cálculo dos parâmetros de transporte de solutos no solo em deslocamento de fluidos miscíveis (BORGES JÚNIOR e FERREIRA, 2006). Assim, foi possível obter o fator de retardamento (R), o coeficiente dispersivo-difusivo (D) e o número de Peclet (P), cujos parâmetros de entrada são: número de observações (valores observados de concentração relativa - C/C_0 , em função do número de volume de poros - NVP), umidade de saturação (decimal), densidade do solo (g cm^{-3}), fluxo (cm h^{-1}), comprimento da coluna de solo (cm) e concentração inicial do soluto no solo e na solução aplicada (g L^{-1}).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1, encontram-se os dados observados com relação à concentração relativa (C/C_0) de potássio (K) e sódio (Na) no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e no Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), quando aplicada apenas água deionizada. Estes dados foram utilizados nas correções das C/C_0 de K^+ e de Na^+ , oriundos das fontes cloreto de potássio (KCl), Poly4 (PL) e vinhaça concentrada (VC), para a confecção das curvas de eluição apresentadas nas Figuras 2 a 7.

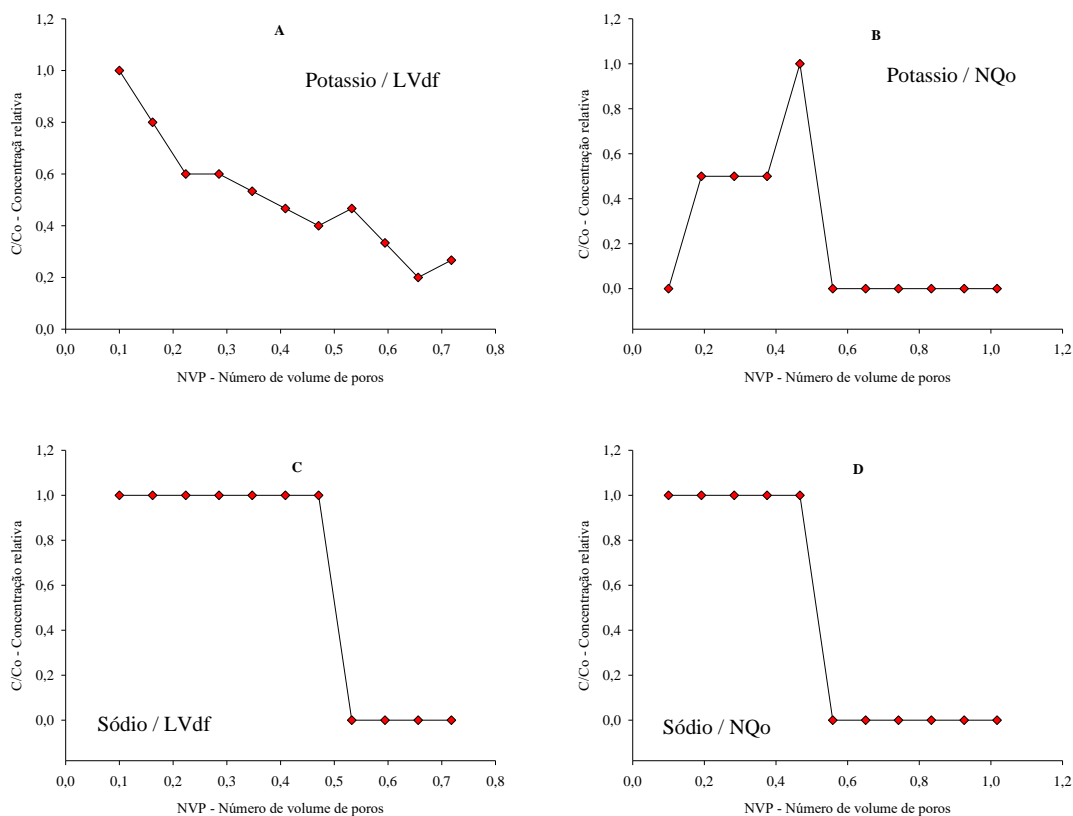


Figura 1. Concentração relativa de potássio (C/Co) (1A e 1B) e sódio (1C e 1D) em função do número de volume de poros (NVP) no Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) (1A e 1C) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (1B e 1D), quando aplicada a água deionizada.

Estes dados já evidenciam diferenciação quanto ao comportamento dos íons nos diferentes solos, em que a C/Co do K não zerou no LVdf (Figura 1A), enquanto no NQo, sua C/Co foi zerada na solução do solo ao 0,56 número de volumes de poros (NVP) (Figura 1B). Para o íon Na^+ , sua C/Co foi zerada em ambos os solos estudados, nos valores 0,53 e 0,56 NVP (Figura 1C e 1D).

O tamanho dos agregados, a textura do solo e o tipo do mineral de argila são fatores que influenciam no transporte destas bases no solo (MIRANDA *et al.*, 2005), sendo que em solos de Cerrado altamente intemperizados de textura média e argilosa, como o LVdf em estudo, apresentam grande afinidade com as bases do solo (K^+ e Na^+) (RAIJ, 1986). Isto pode reduzir ou retardar a lixiviação das mesmas, como observado na Figura 1.

Os valores médios dos parâmetros para o íon K simulados pelo programa DISP-1.1 são apresentados na Tabela 3, tais como fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo-difusivo (D), número de Peclet (P) e coeficiente de determinação (R^2). No LVdf, a fonte KCl apresentou o maior valor de P, enquanto a fonte VC apresentou os maiores valores de R e D. Para o NQo, a fonte VC apresentou o maior valor de P, enquanto a fonte Poly4 apresentou os maiores valores de R e D.

Tabela 3. Valores do número de Peclet (P), fator de retardamento (R) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) do íon potássio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), para as fontes cloreto de potássio, Poly4 e vinhaça concentrada.

| Solo | Parâmetros | Cloreto de potássio | Poly4 | Vinhaça |
|------|-----------------------------------|---------------------|---------|----------|
| LVdf | P | 2,300 | 0,310 | 0,040 |
| | R | 0,575 | 1,538 | 12,953 |
| | D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) | 22,157 | 231,750 | 1205,000 |
| | R^2 | 0,875 | 0,730 | 0,850 |
| NQo | P | 0,890 | 0,290 | 2,45 |
| | R | 0,431 | 0,668 | 0,443 |
| | D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) | 83,191 | 253,080 | 29,876 |
| | R^2 | 0,808 | 0,670 | 0,726 |

LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; NQo: Neossolo Quartzarênico Órtico típico.

P: Número de Peclet; R: Fator de retardamento; D: Coeficiente dispersivo-difusivo; R^2 : Coeficiente de determinação.

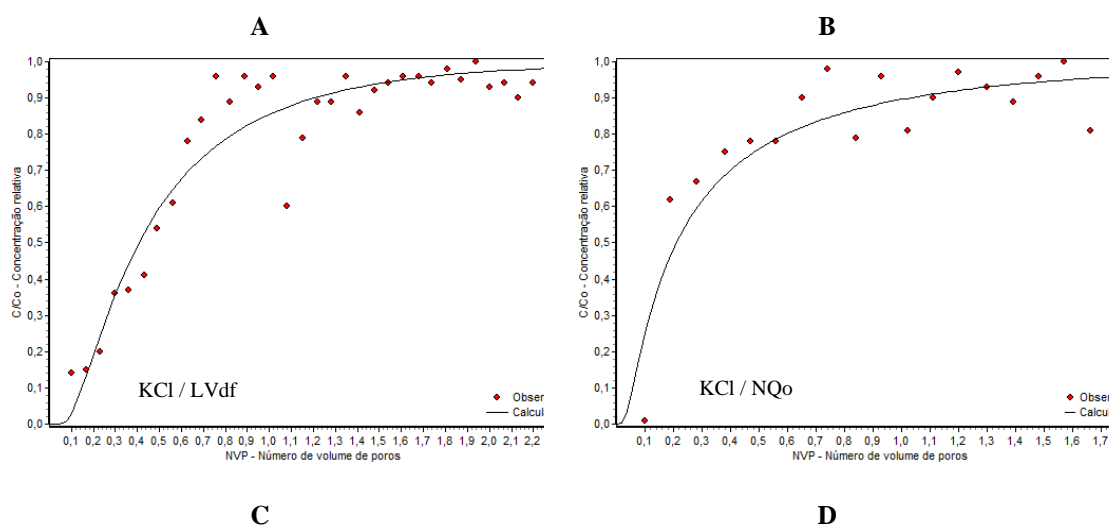
Nota-se, com base nos valores de D, que o íon K no LVdf apresentou a maior mobilidade quando oriundo da fonte VC, pela presença de outras bases (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) na fonte que podem competir pelo sítio de troca, ocasionando o deslocamento para a solução do solo. Enquanto para o NQo a maior mobilidade foi observada na fonte Poly4.

Foi observado efeito acentuado do movimento de dispersão na fonte VC quando aplicada no LVdf, ao analisar o P, em que valores inferiores a 0,4 evidenciam maior efeito de dispersão e, valores acima de 5 da difusão (RIBEIRO, 2011). Contudo, quando analisado o R, ocorreu maior interação entre as fases líquida e sólida, quando comparada com as demais fontes, podendo ser explicado pela maior carga orgânica da VC, servindo de sítio de troca para o K.

O íon K apresentou maiores valores de R no LVdf quando comparado ao NQo e, os menores valores de D, exceto para a fonte VC, corroborando com Lelis Neto *et al.* (2017), que observaram o mesmo comportamento do K oriundo da fonte vinhaça, quando aplicada em solo arenoso e argiloso. Isto evidencia maior interação do íon com o solo argiloso. Quando se compara os valores de R e D no LVdf em relação ao obtidos no NQo (Tabela 3), observa-se redução de 25, 57 e 97% nos valores de R, respectivamente, para as fontes KCl, Poly4 e VC e, o aumento de 276 e 9% no D para as fontes KCl e Poly4 no NQo, respectivamente.

Isso ocorre pela diferença de textura entre os dois solos (Tabela 1), já que a areia presente em grande concentração no NQo é um mineral de baixa atividade e não apresenta a mesma capacidade de interação da argila com o soluto (CABRAL FILHO, 2018).

Observa-se na Figura 2A e 2B que o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo para a fonte KCl corresponderam a aproximadamente 0,1 e 1,0 NVP e 0,05 e 0,9 NVP, respectivamente, representando a concentração de K no efluente de 1616 e 11009 mg dm⁻³ e 0 e 11211 mg dm⁻³. Para a fonte Poly4, o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo corresponderam a aproximadamente 0,05 e 0,8 NVP e 0,01 e 0,8 NVP, respectivamente, representando a concentração de K na solução de 12 e 5454 mg dm⁻³ e 202 e 5656 mg dm⁻³ (Figura 2C e 2D). Enquanto para a VC o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo corresponderam a aproximadamente 0,05 e 0,7 NVP e, 0,1 e 0,8 NVP, representando a concentração de K no efluente de 13 e 2222 mg dm⁻³ e 2 e 2989 mg dm⁻³ (Figura 2E e 2F), respectivamente.



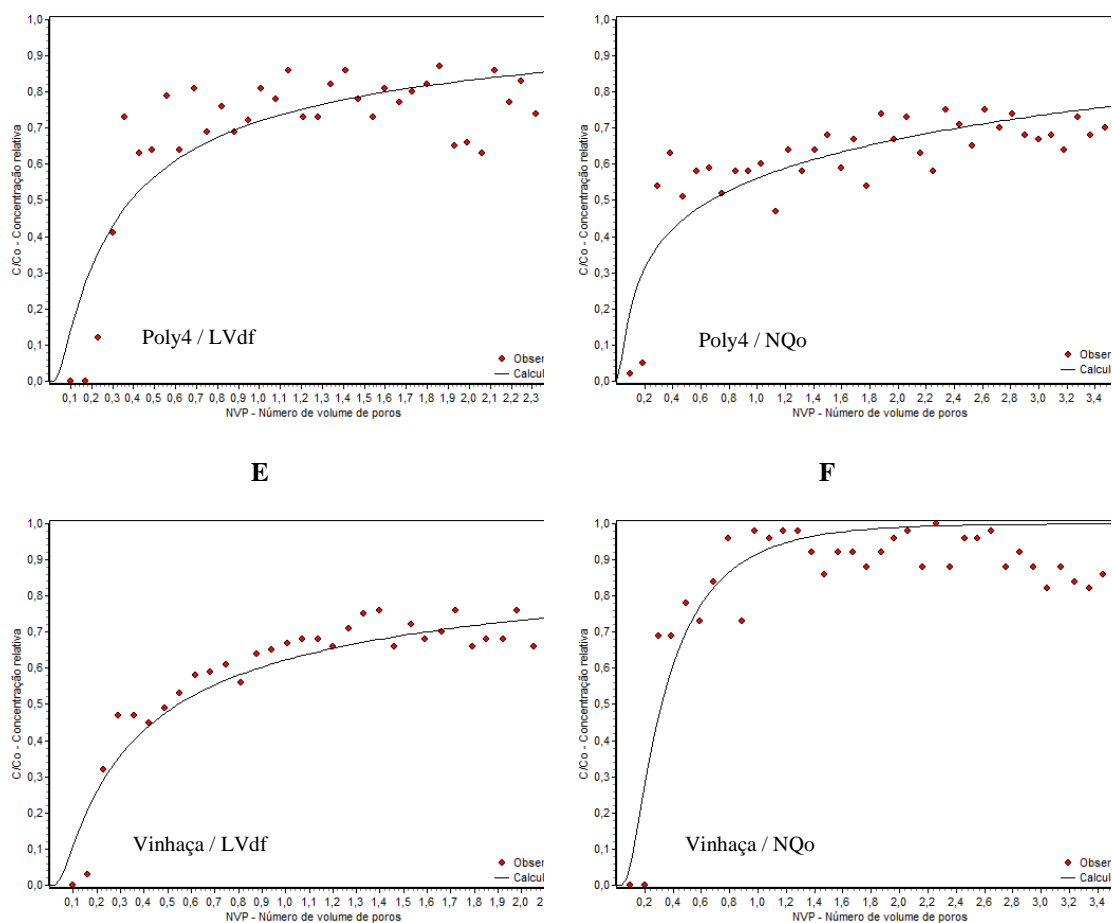


Figura 2. Curva de eluição da concentração relativa de potássio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (A, C e E) e no Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (B, D e F), para a fonte cloreto de potássio (A e B), Poly4 (C e D) e vinhaça (E e F).

Conforme os resultados apresentados na Figura 2A, 2B, 2C, 2D, 2E e 2F ocorreu maior lixiviação de K no solo arenoso (NQo), independente da fonte utilizada desse nutriente, sendo observadas as maiores e menores concentrações lixiviadas na solução do solo para a fonte KCl e VC, respectivamente.

O maior deslocamento para a direita na curva de eluição do K no LVdf para todas as fontes (Figura 2A, 2C e 2E), quando comparado com o NQo (Figura 2B, 3D e 4F), indicam que o íon potássio foi retido com maior intensidade no solo de textura argilosa, ou seja, noLVdf.

A inclinação acentuada da curva com valores abaixo de 1 NVP (Figura 2B, 3D e 4F) ressaltam a baixa interação do íon com o NQo (LELIS NETO et al., 2017). Segundo Nielsen e Biggar (1962), quando o valor correspondente a $C/C_o = 0,5$ é superior a 1,0

NVP na curva de eluição haverá deslocamento para a direita, obtendo maior R e maior interação solo-soluto.

Rivera *et al.* (2008) em estudo aplicando a modelagem da dinâmica da água e potássio no solo, concluíram que a distribuição de potássio é afetada pelas propriedades hidráulicas, químicas e texturais do solo. Independentemente do uso do solo, Ucker *et al.* (2016), afirmam que o potássio apresenta rápida movimentação pelo perfil do Neossolo Quartzarênico. No presente estudo, essa afirmação pode ser aplicada para as diferentes fontes de potássio (Figuras 2, 3 e 4).

Marchuck e Marchuck (2018) relatam influência do tipo do solo (mineralogia da argila) no efeito do potássio sobre a dispersão de argilas, estrutura de poros e condutividade hidráulica, sendo, a magnitude deste efeito, dependente da sua concentração na solução aplicada ao solo.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios dos parâmetros simulados pelo programa DISP-1.1 para o íon Na^+ , relativas ao fator de retardamento (R), coeficiente dispersivo-difusivo (D), número de Peclet (P) e coeficiente de determinação (R^2). No LVdf, a fonte Poly4 apresentou o maior valor de P, enquanto a fonte VC apresentou o maior valor de R e, a fonte KCl apresentou o maior valor de D. Já no NQo, a fonte VC apresentou o maior valor de P, enquanto a fonte Poly4 apresentou os maiores valores de R e D.

Tabela 4. Valores do número de Peclet (P), fator de retardamento (R) e coeficiente dispersivo-difusivo (D) do íon sódio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo), para as fontes cloreto de potássio, Poly4 e vinhaça concentrada.

| Solo | Parâmetros | Cloreto de potássio | Poly4 | Vinhaça |
|------|-----------------------------------|---------------------|----------|---------|
| LVdf | P | 0,100 | 178,810 | 0,500 |
| | R | 4,379 | 0,199 | 11,100 |
| | D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) | 509,600 | 0,402 | 99,680 |
| | R^{2*} | 0,304 | 0,606 | 0,700 |
| NQo | P | 0,060 | 0,040 | 118,11 |
| | R | 4,619 | 6,430 | 0,247 |
| | D ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) | 1234,000 | 1840,000 | 0,620 |

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| R^2 | 0,480 | 0,570 | 0,990 |
|-------|-------|-------|-------|

(já aparece no título da Tabela) * R^2 : Coeficiente de determinação.

Com base nos valores de D, nota-se que o íon Na^+ no LVdf apresentou a maior mobilidade para a fonte KCl, enquanto no solo NQo, a maior mobilidade foi observada na fonte Poly4. O Na^+ apresentou o maior valor de R no solo LVdf para a fonte vinhaça concentrada quando comparado ao solo NQo, enquanto para as fontes KCl e Poly4 o íon Na^+ apresentou os maiores valores de R no solo NQo.

Diferentemente do que se esperava, o R foi maior no solo NQo em relação ao observado no LVdf, para as fontes KCl e Poly4, porém, o efeito de dispersão e difusão do íon nesse solo foi extremamente alto, podendo ter compensado o retardamento.

O íon K apresentou comportamento semelhante no solo NQo para todas as fontes utilizadas (Tabela 3), evidenciando, portanto, influência das fontes na dinâmica dos íons K^+ e Na^+ quando num mesmo solo, principalmente no arenoso.

Para o solo argiloso, esse comportamento foi heterogêneo, indicando a influência das diferenças químicas entre os íons, pois nesse tipo de solo as características do íon (concentração na solução e preferência no sítio de troca) passam a ser significativas nos processos de difusão, dispersão e retenção, pelas interações de troca catiônica mais acentuadas.

Observa-se na Figura 3A e 3B que o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo para a fonte KCl corresponderam a aproximadamente 0,05 e 0,8 NVP e 0,05 e 0,6 NVP, representando a concentração de Na^+ no efluente de 50,5 e 202 $mg\ dm^{-3}$ e 0,0 e 202 $mg\ dm^{-3}$, respectivamente. Para a fonte Poly4, o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo corresponderam a aproximadamente 0,15 e 0,3 NVP e 0,05 e 1,2 NVP, representando a concentração de sódio no efluente de 0,0 e 707 $mg\ dm^{-3}$ e 202 e 707 $mg\ dm^{-3}$ (Figura 3C e 3D), respectivamente. Enquanto para a fonte VC, o limite inferior e superior para as inflexões da curva no LVdf e no NQo corresponderam a aproximadamente 0,05 e 1,2 NVP e 0,2 e 0,4 NVP, representando a concentração de sódio na solução de 1 e 61 $mg\ dm^{-3}$ e 0,0 e 61 $mg\ dm^{-3}$ (Figura 3E e 3F), respectivamente.

A

B

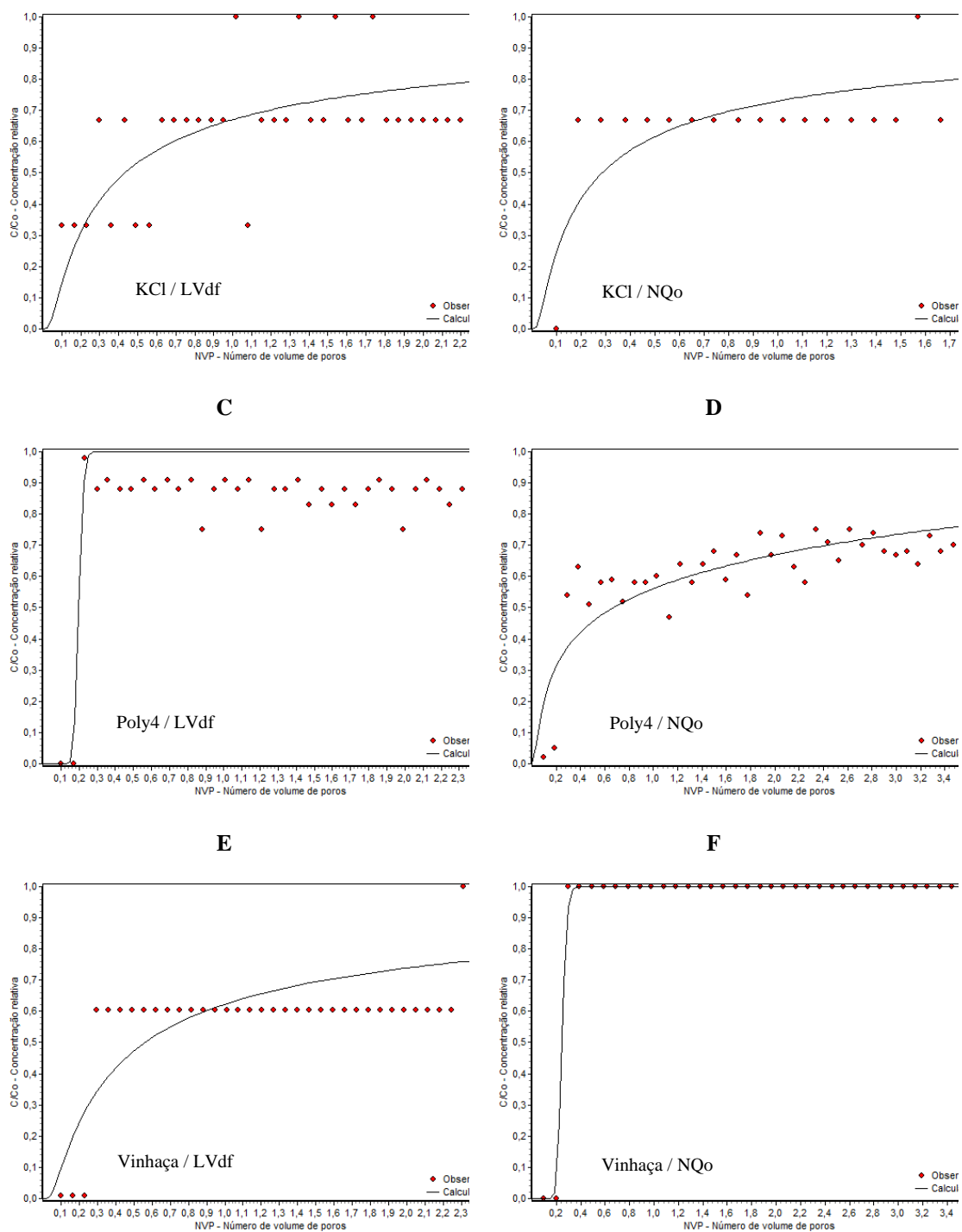


Figura 3. Curva de eluição da concentração relativa de sódio no Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (A, C e E) e Neossolo Quartzarênico Órtico típico (NQo) (B, D e F), para a fonte cloreto de potássio (A e B), Poly4 (C e D) e vinhaça (E e F).

Observou-se maior deslocamento para a direita na curva de eluição do sódio para o LVdf (Figura 3A) quando comparado com o NQo (Figura 3B), indicando que o íon Na^+

oriundo da fonte KCl foi retido com maior intensidade no solo de textura argilosa. O mesmo comportamento foi observado para o íon Na^+ oriundo da fonte VC (Figura 3E e 3F). Contudo, independente da fonte aplicada, em ambos os solos não ocorreu diferença na lixiviação do íon Na^+ .

Segundo Franco *et al.* (2017), o solo argiloso possui maior capacidade de reter sais do que o solo arenoso, corroborando com os resultados encontrados para o K^+ e Na^+ , independentemente da fonte utilizada. A capacidade de troca catiônica dos solos é o principal componente que influencia na relação K trocável/K da solução, e refletirá em menores ou maiores perdas de K por lixiviação, sendo influenciada pela textura do solo e teor de matéria orgânica (MIELNICKZUK, 1982), pelo tipo de argila e pela precipitação pluvial.

Conforme as curvas de eluição de K^+ e Na^+ apresentadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente, a fonte VC obteve as menores concentrações dos íons na solução coletada para ambos os solos, evidenciando o efeito de interação da matéria orgânica presente na vinhaça concentrada, com os nutrientes catiônicos, pela presença de cargas negativas na matéria orgânica. Segundo Campos *et al.* (2011) a elevação do teor de matéria orgânica em solos favorece o aumento da capacidade de troca catiônica, principalmente em solos arenosos (NQo), em que o processo de lixiviação é mais acentuado. No presente estudo, a fonte KCl promoveu maior concentração do íon K^+ no LVdf e no NQo, enquanto a fonte Poly4, maior concentração do íon Na^+ nos dois solos.

Segundo Lacerda *et al.* (2018), a falta de conhecimento das condições físico-químicas do solo pode resultar em prejuízos na eficiência da adubação potássica, pela grande perda de nutrientes em função do processo de lixiviação, causando prejuízos econômicos e impactos ambientais. Ainda, segundo o autor, este problema pode ser agravado quando se trata de nutrientes com alta mobilidade, como é o caso do sulfato. Portanto, como evidenciado no presente estudo, a fonte Poly4, rica em sulfato, foi a que apresentou maior lixiviação de Na^+ e a segunda maior lixiviação de K, demonstrando que a utilização desse fertilizante deve ser feita de forma criteriosa, principalmente em solo arenoso, como no caso do NQo.

Neste contexto, torna-se importante estudos desta natureza, considerando-se o potencial de uso de fontes alternativas de potássio, como por exemplo, a vinhaça concentrada, que apresenta a vantagem de conter além de potássio, matéria orgânica e outros nutrientes de plantas, que são restituídos (reciclados) ao solo. Vale destacar

também a polihalita como fonte de potássio, que, também, contém outros nutrientes na composição. Quanto ao KCl, constitui o principal fertilizante potássico utilizado no Brasil, sendo mais de 90% importado, e representa expressiva parcela no custo de produção da cultura do milho no país, torna-se, assim, essencial o manejo correto desta fonte, considerando as condições edáficas, sobretudo a textura e a capacidade de troca catiônica a do solo, as condições climáticas locais, em especial a precipitação pluvial.

3.4 CONCLUSÕES

Os íons potássio e sódio desempenham maior mobilidade no Latossolo Vermelho distroférico quando utilizadas as fontes vinhaça e cloreto de potássio, respectivamente. Já no Neossolo Quartzarênico, os íons potássio e sódio apresentam maior mobilidade quando utilizada a fonte Poly4.

O Latossolo Vermelho distroférico demonstra maior interação com o íon potássio e sódio, tendo assim, menor lixiviação quando comparado com o Neossolo Quartzarênico.

A fonte vinhaça concentrada apresenta a menor concentração dos íons potássio e sódio na solução lixiviada em comparação com as fontes cloreto de potássio e Poly4.

3.5 BIBLIOGRAFIA CITADA

ALVES, P.R.L.; LUZ, T.N.; SOUSA, J.P.; CARDOSO, E.J.B.N. Ecotoxicological characterization of sugarcane vinasses when applied to tropical soils. **Science of the total environment**, v. 526, p. 222-232, 2015.

BENITES, V.M.; CARVALHO, M.C.S.; RESENDE, A.V.; POLIDORO, J.C.; BERNADI, A.C.C.; OLIVEIRA, F.A. Potássio, cálcio e magnésio. In: Prochnow, L.I.; Casarin, V.; Stipp, S.R. (Eds.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba, SP: IPNI, Cap. 3, p. 137-191, 2010.

BERNARDI, A.C. de C.; OLIVEIRA JR, J.P. de.; LEANDRO, W.M.; MESQUITA, T.G. da S.; FREITAS, P.L. de.; CARVALHO, M.C.S. Doses e formas de aplicação da adubação potássica na rotação soja, milheto e algodão em sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 39, n. 2, p. 158, 2009.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 604-611, 2006.

CABRAL FILHO, F.R.; VIEIRA, G.S.; SILVA, N.F.; CUNHA, E.S.; SANTOS, L.N.S.; RODRIGUES, C.R.; CUNHA, F.N.; TEIXEIRA, M.B.; SOARES, F.A.L. Sugarcane vinasse cations dynamics in Cerrado soils, Brazil. **Sugar Tech**, v. 21, n. 1, p. 38-46, 2019.

CAMPOS, L.P.; LEITE, L.F.C.; MACIEL, G.A.; IWATA, B. de F.; NÓBREGA, J.C.A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 1681-1689, 2011.

CHRISTOFOLETTI, C.A.; ESCHER, J.P.; CORREIA, J.E.; MARINHO, J.F.U.; FONTANETTI, C.S. Surgacane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (**CETESB**). Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. P4.231. Dez/2006. Disponível em: chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://cetesb.sp.gov.br/camaras-ambientais/wp-content/uploads/sites/21/2013/12/P4_231.pdf

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World reference base for soil resources 2014**: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Update 2015. Rome, 192p., 2015.

FRANCO, E.M.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; DIAS, N.S.; BISSI JÚNIOR, C.J.; FERNANDES, C.S. Percolação de solutos em solo fertirrigado por gotejamento, utilizando extratores de solução. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 1, p. 1180-1190, 2017.

LACERDA, C.F.; FERREIRA, J.F.S.; SUAREZ, D.L.; FREITAS, E.D.; LIU, X.; RIBEIRO, A.A. Evidence of nitrogen and potassium losses in soil columns cultivated with maize under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 553-557, 2018.

LEAL, A. J.F.; VALDERRAMA, M.; LANEKO, F.H.; LEAL, U.A. S.; PERIN, A.; LUCHESE, K.U.O. Produtividade da soja de acordo com diferentes doses de cloreto de potássio revestido ou não com polímeros. **Global Science and Technology**, v.08, n.01, p.19 –30, jan/abr, 2015.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP. 329p, 2005.

LELIS NETO, J.A.; MIRANDA, J.H.; GRIGOLON, B.G.; KAMOGAWA, M.Y.; TEIXEIRA, M.B.; SILVA, N. F. Transporte e adsorção de nitrato e potássio em colunas de solo sob aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira De Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 6, p. 1797-1803, 2017.

MARCHUK, S.; MARCHUCK, A. Effect of applied potassium concentration on clay dispersion, hydraulic conductivity, pore structure and mineralogy of two contrasting Australian soils. **Soil & Tillage Research**, v. 182, p. 35-44, 2018.

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: Segato, S.V.; Pinto, A.S.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editorial 2006. p.369-375, 2006.

MATOS, A.T. de; GARIGLIO, H.A. de A.; LO MONACO, P.A.V. Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 743-749, 2013.

MELLO, S.C.; PIERCE, F.J.; TONHATI, R.; ALMEIDA, G.S.; NETO, D.D.; PAVULURI, K. Potato response to Polyhalite as a potassium source fertilizer in Brazil: Yield and quality. **HortScience**, v. 53, n. 3, p. 373-379, 2018.

MIELNICKZUK, J. Avaliação da resposta das culturas ao potássio em ensaios de longa duração: Experiências brasileiras. In: Yamada, T.; Muzzilli, O. & Usherwood, N.R., eds. **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba, Instituto da Potassa e Fosfato, p.289-303, 1982.

MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; LIBARDI, P.L.; FOLEGATTI, M.V. Simulação do deslocamento de potássio em colunas verticais de solo não-saturado. **Engenharia Agrícola**, v. 25, p. 677-685, 2005.

NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Miscible displacement: III, Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 26, n. 3, p. 216-221, 1962.

PARENTE, T.L.; LAZARINI, E.; CAION, S.; SOUZA, L.G. M.; PIVETTA, R.S.; BOSSOLAN, J.W. Potássio em cobertura no milho e efeito residual na soja em sucessão. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 10, p. 193-200, 2016.

RAIJ, B.V. Simpósio Avançado de Química e Fertilidade do Solo: **Propriedades Eletroquímicas de Solos. Campinas: Fundação Cargill**, p.9-39, 1986.

RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S.; OLIVERA, C.G.; SENA, M.C.; MACHADO, C.T.T.; KIMPARA, J.D.; OLIVEIRA FILHO, E.C. Suprimento de potássio e pesquisa de uso de rochas “*in natura*” na agricultura brasileira. **Espaço & Geografia**, v.9, p.19-42, 2006.

RIBEIRO, B.T.; LIMA, J.M.D.; GUILHERME, L.R.G.; JULIÃO, L.G.F. Lead sorption and leaching from an Inceptisol sample amended with sugarcane vinasse. **Scientia Agrícola**, v. 67, p. 441-447, 2010.

RIBEIRO, D.P. **Efeito da velocidade de escoamento da solução e do comprimento da coluna de solo nos parâmetros de transporte de solutos em solos argiloso e arenoso**. 2011, 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

RIBEIRO, P.H.P.; LELIS NETO, J.A.; TEIXEIRA, M.B.; GUERRA, H.O.C.; SILVA, N.F.; CUNHA, F. N. Distribuição de potássio aplicado via vinhaça em Latossolo vermelho amarelo e Nitossolo vermelho. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 8, n. 5, p. 403, 2014.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento - análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 448-459, 2008.

SANTOS, H.G.; JACOMINE P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. DE; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 Ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, E.L. **Adubação potássica na cultura da soja cultivada na região de Cerrado maranhense**. 2016, 31 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Agronomia) - Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Chapadinha - MA, 2016.

SILVA, F. de F. **Uso de Polihalita na adubação da soja e seu efeito residual na produção de milho**. 2019, 41p. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias – Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 858p, 2017.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3ª edição revista e ampliada. Embrapa, Brasília, DF, 574 p., 2017.

UCKER, F. E.; de CAMPOS, A. B.; HERNANI, L. C.; MACÊDO, J. R.; MELO, A. S. Movimentação vertical do íon potássio em Neossolos Quartzarênicos sob cultivo com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1548-1556, 2016.

USDA - United States Department Of Agriculture Natural Resources Conservation Service. **Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys**. Second Edition, 863 p., 1999.

VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. de.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In.: Sousa, D.M.G.; Lobato, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. Cap. 7, p. 169-183, 2004.

WERLE, R.; GARCIA, R.A.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2297-2305, 2008.

4 CAPÍTULO II

ASPECTOS ECONÔMICOS E PRODUTIVOS DO MILHO DE SEGUNDA SAFRA FERTIRRIGADO COM DIFERENTES MANEJOS DE VINHAÇA CONCENTRADA

Resumo: Do custo total de produção do milho, a maior parte é por causa da aplicação de fertilizantes. Portanto, a utilização de fertilizantes orgânicos na cultura do milho pode contribuir não somente do ponto de vista nutricional, mas, também econômico, o custo da tonelada deste tipo de fertilizante é menor do que de adubos minerais; além de que, quando manejado adequadamente é uma forma de reciclagem de nutrientes e de destinação mais adequada desse resíduo no meio ambiente. Objetivou-se avaliar o efeito do uso isolado e associado de vinhaça concentrada (VC) e cloreto de potássio (KCl), com e sem parcelamento da dose, sobre as variáveis biométricas de crescimento, teor de potássio na folha, componentes produtivos, produtividade de grãos e custo de produção na cultura do milho segunda safra. O estudo foi conduzido na área experimental no município de Rio Verde – GO. O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, analisado em esquema de experimento simples, com quatro repetições, totalizando 20 parcelas experimentais. A dose de potássio utilizada foi equivalente a $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$. T1 = 100% da dose recomendada, na forma de KCl no estágio fenológico de V4 da cultura do milho; T2 = 100% da dose de potássio recomendada, na forma de VC no estágio fenológico de V4; T3 = 50% da dose de potássio na forma de KCl + 50% via VC no estágio fenológico de V4 na cultura do milho; T4 = 100% da dose de potássio via VC, parcelada nos estádios fenológicos de V4 e V8; T5 = 50% da dose aplicado via KCl + 50% via VC nos estádios fenológicos de V4 e V8 da cultura do milho. A suplementação de potássio mista, via cloreto de potássio e vinhaça concentrada não beneficia a produtividade de grãos da planta de milho, sendo recomendado a utilização isolada de cloreto de potássio ou de vinhaça concentrada. A utilização de 100% do potássio via vinhaça concentrada proporciona a maior eficiência agrônômica do nutriente.

Palavras-chave: *Zea mays* L., reciclagem de nutrientes, adubação potássica, potássio, cloreto de potássio, eficiência econômica, produtividade.

Abstract: Of the total production cost per hectare of corn, most is due to the fertilizers application. Therefore, the use of organic fertilizers in corn cultivation can contribute not only from a nutritional point of view, but also economically, as the cost per ton of this type of fertilizer is lower than that of mineral fertilizers. The objective of this study was to evaluate different potassium management with and without the use of concentrated vinasse, in contrast to potassium chloride, observing the effects in the potassium content in the leaf, grain productivity and production cost in the second harvest corn crop. The test was carried out in an experimental field in the city of Rio Verde – GO. The experimental design used was randomized blocks, analyzed in a simple experiment scheme, with 4 replications, totaling 20 experimental plots. Treatment 1 = KCl - 100% of the potassium dose applied via potassium chloride at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 2 = Vinasse - 100% of the dose of potassium applied via concentrated vinasse at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 3 = Vinasse

+ KCl - 50% of the dose of potassium applied via Potassium Chloride and 50% via concentrated vinasse at the V4 phenological stage in the corn crop; Treatment 4 - Vinasse 2x 100% of the dose of potassium applied via concentrated vinasse at the phenological stage of V4 and V8 in the corn crop; Treatment 5 = Vinasse 2x + KCl 2x - 50% of the dose of potassium applied via Potassium Chloride and 50% via concentrated vinasse at the phenological stage of V4 and V8 in the corn crop. Mixed potassium supplementation via potassium chloride and concentrated vinasse does not benefit the corn grain productivity, and the isolated use of potassium chloride or concentrated vinasse is recommended. The use of 100% potassium supplied via concentrated vinasse provides the greatest nutrient agronomic efficiency.

Keywords: potassium, potassium chloride, economic efficiency, productivity.

4.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho (*Zea mays* L.) e o segundo maior exportador no mundo. O milho é a segunda maior cultura agrícola no país, ficando atrás apenas da soja (CONAB, 2023a). Conforme o levantamento efetuado pela SEAPA (2023), o estado de Goiás fica em quarto lugar no quesito produção e terceiro em produtividade da cultura do milho, sendo que Rio Verde é o município com maior produção de milho no estado.

No estado de Goiás, o cultivo do milho ocorre prioritariamente na segunda safra, período que compreende a menor pluviosidade da região, o que é prejudicial a cultura porque a planta apresentar um período crítico sensível ao déficit hídrico que vai da pré-floração ao enchimento dos grãos (FERREIRA, 2017).

Nos últimos 46 anos, o milho no Brasil representou uma área plantada incrementada de 9.319,4 mil hectares (79%), com a produtividade acrescida em 3.688,0 kg/ha (226%), e a produção obteve o aumento de 93.085,4 mil toneladas (483%). Estima-se que a produção do cereal deve alcançar o recorde de aproximado 102,5 milhões de toneladas, sinalizando a importância da cultura para economia do país (CONAB, 2022).

Com o aumento significativo da produção e da produtividade, nesses últimos anos, a cultura do milho vem sofrendo mudanças tecnológicas relacionadas à melhoria na qualidade dos solos. Em relação a exigência nutricional, observa-se que a extração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio aumenta linearmente com o aumento de produtividade e, que a maior exigência da cultura é referente a nitrogênio e potássio, seguido de cálcio, magnésio e fósforo (COELHO *et al.*, 2010).

Em complemento, do custo total de produção por hectare do milho, sendo R\$ 60,00 por cada saca de 60 kg produzida, a maior parte é pela aplicação de fertilizantes,

sendo R\$ 12,17 por cada saca de 60 kg produzida (20,3 %) (CONAB, 2023b). Portanto, a utilização de fertilizantes orgânicos na cultura do milho podem contribuir não somente do ponto de vista nutricional, mas, também econômico, em virtude do custo da tonelada deste tipo dessa fonte de fertilizante ser menor do que dos adubos minerais.

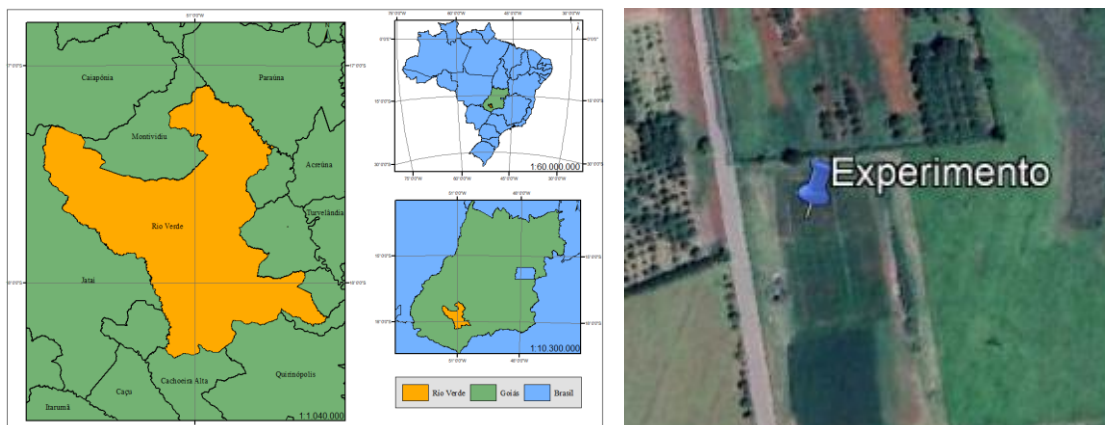
A vinhaça de cana-de-açúcar que antigamente era vista com alto potencial poluidor, representa grande valor econômico. Atualmente, a vinhaça concentrada é utilizada em larga escala na fertirrigação das lavouras de cana-de-açúcar, tendo como benefícios sua composição química de nutrientes e matéria orgânica, como o nitrogênio, cálcio, magnésio e fósforo em menores concentrações (SEIXAS *et al.*, 2016) e, principalmente o potássio (K), que corresponde cerca de 20% do total de compostos orgânicos e minerais (MARQUES, 2006).

Neste sentido, a hipótese deste estudo é que a utilização da vinhaça concentrada de cana-de-açúcar pode substituir a adubação mineral com cloreto de potássio, proporcionando maiores produtividades de grãos e redução no custo de produção. Portanto, objetivou-se avaliar diferentes manejos de potássio (Uso isolado e associado de vinhaça concentrada e cloreto de potássio com e sem parcelamento da dose) com e sem a utilização da vinhaça concentrada, em contraste com o cloreto de potássio, observando os efeitos sobre o teor de potássio na folha, produtividade de grãos e custo de produção na cultura do milho segunda safra.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Implantação do experimento

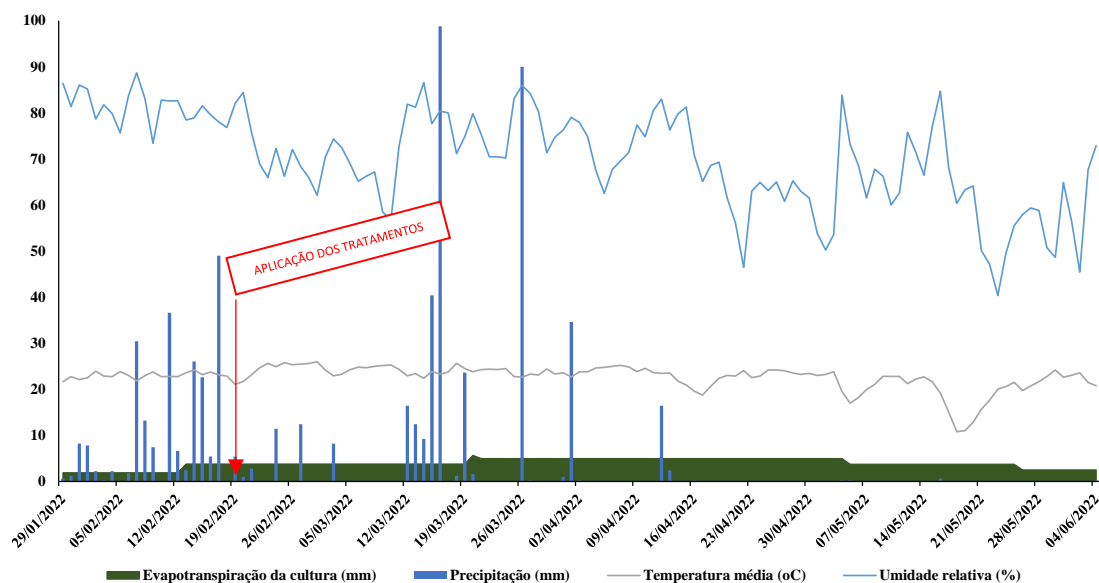
O estudo foi conduzido em uma área experimental no IF Goiano, município de Rio Verde – GO, localizada na região sudoeste do estado, nas coordenadas geográficas 17°48'29.3"S 50° 53' 57.9"W; com altitude média de 720 m ao nível do mar. O clima da região é classificado conforme Köppen & Geiger (1928) e Alvares *et al.* (2013), como Aw (tropical), com chuva nos meses de outubro a maio e, com seca nos meses de junho a setembro.



Fonte: Autor (2022)

Figura 1. Caracterização do município de Rio Verde e do local do experimento (Milho segunda safra 2022/23).

A temperatura média anual possui pequena variação sazonal, apresentando média de 23,8°C, concentrando os maiores valores no mês de outubro, com 24,5°C, e os menores valores no mês de julho, com 20,8°C. A precipitação pluvial média anual varia entre 1430 e 1650 mm, concentrados de outubro a maio, ocasião em que são registradas mais de 80% do total das chuvas e, o relevo é suave ondulado (6% de declividade). Durante o desenvolvimento da cultura do milho, os dados climáticos locais foram monitorados e as médias diárias estão dispostas na Figura 2, cuja precipitação ocorrida foi de: 10 mm (janeiro), 246,8 mm (fevereiro), 303 mm (março), 53,8 mm (abril), 1 mm (maio) e 0,2 mm (junho) = Total de 614,8 mm.



Fonte: Autor (2023)

Figura 2. Dados meteorológicos e a evapotranspiração da cultura do milho de segunda safra, no período decorrente do experimento, (Milho segunda safra 2022/23).

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), fase Cerrado, de textura argilosa (SANTOS *et al.*, 2018). Antes da instalação do experimento, foram efetuadas coletas amostras de solo deformadas, para a caracterização físico-química, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm. (Tabela 1).

Tabela 1. Características físico-químicas do solo da área experimental, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, coletado antes da instalação do experimento.

| Camada | pH | M.O. | P | K | Ca | Mg | Al | H+Al | CTC | V |
|--------|-----|--------------------|---------------------|------------------------------------|----|----|----|------|------|----|
| | | g dm ⁻³ | mg dm ⁻³ | mmol _c dm ⁻³ | | | | | | %- |
| 0-20 | 5,2 | 41 | 9 | 4,3 | 19 | 10 | 0 | 52 | 85,3 | 39 |
| 20-40 | 5,2 | 33 | 7 | 3,4 | 16 | 8 | 0 | 52 | 79,4 | 35 |

| | m | S | B | Cu | Fe | Mn | Zn | Argila | Silte | Areia |
|-------|---------|---------------------|------|-----|----|-----|-----|-------------------|-------|-------|
| | -- % -- | mg dm ⁻³ | | | | | | gkg ⁻¹ | | |
| 0-20 | 0 | - | 0,23 | 3,3 | 31 | 4,8 | 0,5 | 366 | 166 | 468 |
| 20-40 | 0 | - | 0,28 | 3,6 | 31 | 3,5 | 0,4 | 420 | 432 | 148 |

Fonte: Autor (2023)

P (Fósforo) = Mehlich 1, K (Potássio), Na (Sódio), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zn (Zinco) = Melich 1; Ca (Cálcio), Mg (magnésio), e Al (Alumínio) = KCl 1 mol. L⁻¹; Ca (H₂PO₄)₂ 0,01 mol.L⁻¹; M.O. = Método colorimétrico; B (Boro) = água quente

CTC = Capacidade de troca catiônica; V = saturação de bases; m = saturação de alumínio; M.O. = Matéria orgânica

O milho (híbrido FS575PWU) foi semeado em 29/01/2022, utilizando uma semeadora de cinco linhas com sistema de distribuição de sementes por disco horizontal. O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m com três plantas por metro linear, almejando representatividade de 66.666 plantas por hectare. O sistema de semeadura utilizado foi o de plantio direto, tendo como cultura antecessora a soja (safra 2021/22).

4.2.2 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, analisado em esquema de experimento simples, com quatro repetições, totalizando 20 parcelas experimentais. Os tratamentos consistiram em cinco formas de manejos (uso isolado ou

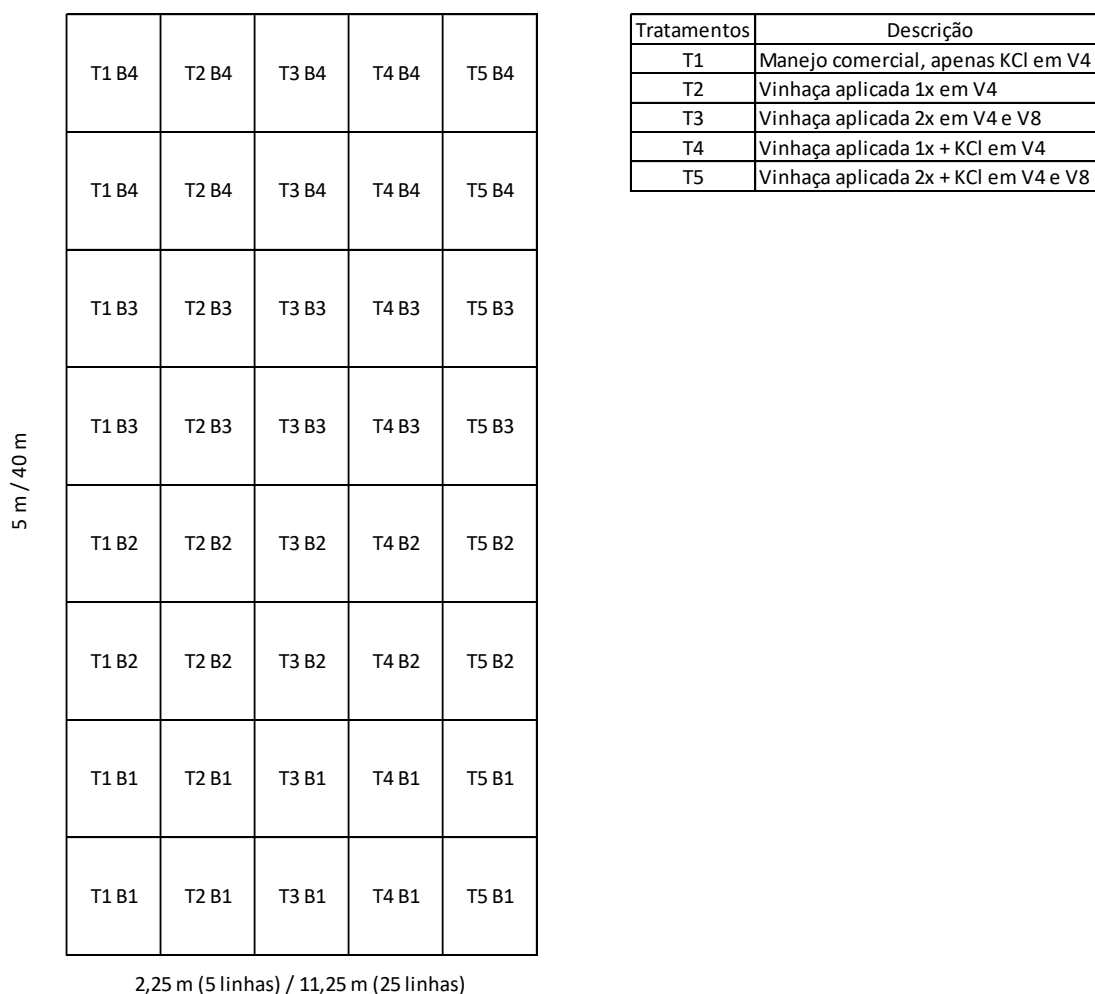
associado e parcelamentos) da adubação potássica em cobertura na cultura do milho, utilizando vinhaça concentrada via fertirrigação e o cloreto de potássio (KCl) via aplicação a lanço (Tabela 2). As parcelas experimentais foram compostas por cinco linhas de cinco metros de comprimento (11,25 m²), totalizando a área ocupada pelo experimento de 450 m² (Figura 3).

Tabela 2. Descrição dos tratamentos utilizados.

| Tratamento | Dose de potássio (kg ha ⁻¹) | Manejo |
|---------------------|---|---|
| KCl | 200 | 100% da dose de potássio, aplicada via Cloreto de potássio no estágio fenológico de V4 da cultura do milho. |
| Vinhaça | 200 | 100% da dose de potássio aplicada via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 da cultura do milho. |
| Vinhaça+KCl | 200 | 50% da dose de potássio aplicada via Cloreto de potássio e 50% via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 da cultura do milho. |
| Vinhaça 2x | 200 | 100% da dose de potássio aplicada via Vinhaça concentrada nos estádios fenológicos de V4 e V8 da cultura do milho. |
| Vinhaça 2x + KCl 2x | 200 | 50% da dose de potássio aplicada via Cloreto de potássio e 50% via Vinhaça concentrada nos estádios fenológicos de V4 e V8 da cultura do milho. |

Fonte: Autor (2023).

KCl= Cloreto de potássio.



Fonte: Autor (2023).

Figura 3. Croqui do experimento instalado em campo.

4.2.3 Condução e aplicação dos tratamentos

A aplicação dos tratamentos ocorreu apenas na cobertura do milho via fertirrigação (vinhaça concentrada) e sólido granulado (cloreto de potássio), conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004) (200 kg ha⁻¹ de potássio) e, seguindo os tratamentos descritos. A fonte cloreto de potássio utilizada foi o granulado de coloração avermelhada, com concentração de 60% de K₂O. A vinhaça concentrada foi adquirida na Usina Boa Vista – Unidade de Quirinópolis - GO, com volume de 1000 L. A vinhaça foi concentrada 20 vezes, e tinha a quantidade de 10 kg de K₂O por metro cúbico. Portanto, para o fornecimento da dose de 200 kg por hectare de K₂O foi necessária a aplicação de 333,33 kg de KCl e 20.000 litros (20 m³ = 2 mm) de vinhaça concentrada.

| | | K2O ha (kg) | KCl (%) | Vinhaça (kg 1000 L) | Quantidade de KCl (kg ha) | Quantidade de vinhaça (L ha) |
|----|-------------|-------------|---------|---------------------|---------------------------|------------------------------|
| T1 | KCl | 200,00 | 60,00 | 10,00 | 333,33 | 0,00 |
| T2 | VINHAÇA | 200,00 | 60,00 | 10,00 | 0,00 | 20000,00 |
| T3 | VINHAÇA | 200,00 | 60,00 | 10,00 | 0,00 | 20000,00 |
| T4 | VINHAÇA+KCl | 200,00 | 60,00 | 10,00 | 166,67 | 10000,00 |
| T5 | VINHAÇA+KCl | 200,00 | 60,00 | 10,00 | 166,67 | 10000,00 |

| Quantidade de KCl (kg tratamento) | Quantidade de vinhaça (L tratamento) | Quantidade de KCl em V4/V8 (kg tratamento) | Quantidade de vinhaça em V4/V8 (L tratamento) |
|-----------------------------------|--------------------------------------|--|---|
| 3,33 | 0,00 | 3,33 | 0,00 |
| 0,00 | 200,00 | 0,00 | 200,00 |
| 0,00 | 200,00 | 0,00 | 100,00 |
| 1,67 | 100,00 | 1,67 | 100,00 |
| 1,67 | 100,00 | 0,83 | 50,00 |

Fonte: Autor (2023).

Figura 4. Quantidades dos fertilizantes aplicados por tratamento.

4.2.4 Variáveis analisadas

4.2.4.1 Crescimento e acúmulo de matéria seca

No momento do florescimento, aos 70 dias após a semeadura, foram determinados as variáveis de crescimento e o acúmulo de matéria seca pela cultura do milho, sendo avaliados: Altura de planta (AP – m); Altura de inserção da espiga (AIE – m); Diâmetro do colmo (DC – mm); Número de folhas (NF); Área foliar (AF – cm²); Massa seca da folha (MSF), de colmo (MSC), de espiga e total ; e Relação MSF/MSC.

4.2.4.2 Teor de potássio, variáveis produtivas e eficiência agrônômica

No momento do florescimento, foi coletada a folha oposta e abaixo a espiga principal (superior). A folha foi processada apenas o limbo foliar central sem a nervura central. O material seco em estufa de circulação forçada de ar a 65°C até massa constante. A seguir foi moído em moinho tipo Willey e levado ao laboratório para a determinação do teor de potássio (g /kg⁻¹).

Para avaliar a produtividade de grãos, foram colhidos 3,6 m² por parcela a área útil de, sendo que foram determinados através da medição de duas espigas: Número de espigas por planta (NEP); Comprimento de espiga (CE – cm); Diâmetro de espiga (DE – mm); Número de fileiras de grãos (NFG); Número de grãos por fileira (NGF); Número de grãos por planta (NGPlanta); Massa de mil grãos (MMG - gramas) e a Massa de grãos por planta (MGPlanta – gramas por planta). A produtividade de grãos (PROD – kg ha⁻¹) e a quantidade de sacas por hectare (SCHA – sacas de 60 kg por hectare) foram estimados conforme a trilhagem dos grãos da área útil de cada parcela, sendo que, a massa de grãos foi corrigida para a umidade de 13%.

Após a obtenção da produção de grãos por tratamento, foi possível efetuar o cálculo dos índices agronômicos, sendo eles:

$$IEA = \frac{PROD_t}{DK} \quad (1)$$

$$EAK = \frac{(PROD_{vc} - PROD_{kcl})}{DK} \quad (2)$$

$$PRODRel = PROD_{vc} / PROD_{kcl} \quad (3)$$

Em que:

IEA = Índice de eficiência agronômica, kg grãos kg K⁻¹;

PROD_t = Produtividade de grãos por tratamento, kg ha⁻¹;

DK = Dose aplicada de potássio por tratamento, kg ha⁻¹;

EAK = Eficiência agronômica de potássio, kg grãos kg K⁻¹;

PRODRel = Produtividade relativa, kg grãos kg grãos⁻¹;

PROD_{kcl} = Produtividade de grãos com a utilização de Cloreto de potássio;

PROD_{vc} = Produtividade de grãos com a utilização de Vinhaça concentrada.

4.2.4.3 Variáveis econômicas

Para a avaliação da viabilidade econômica dos tratamentos, primeiramente foram levantados os preços dos fertilizantes utilizados na produção de milho segunda safra, na safra 2023.

O custo operacional de cada tratamento foi definido como sendo o gasto com a fonte e a dose do fertilizante, obtido em reais por hectare (R\$ ha⁻¹).

O valor da saca de milho paga ao produtor na época da comercialização, no mercado de Rio Verde - GO no período de janeiro a outubro de 2023, era de R\$ 58,50 a saca ou R\$ 0,98 kg (CONAB, 2023b).

O valor da vinhaça concentrada, considerando-se o processo de concentração, o transporte e a aplicação, é de R\$ 25,00 o metro cúbico. O valor do cloreto de potássio no período de janeiro a outubro de 2023 foi de R\$ 2.400,00 a tonelada.

Após estimar os custos de cada tratamento, foram calculados os indicadores de rentabilidade, conforme descritos em Martin *et al.* (1998) e Francischini *et al.* (2018): a) Receita bruta (RB): em R\$ ha⁻¹, é a receita obtida com a venda da produção, em R\$ ha⁻¹, resultado do produto entre o volume de grãos colhidos (Y), em uma unidade produtiva,

dado em sacas ha^{-1} , e o preço efetivamente recebido no mercado pelo grão (P_g), em reais por saca, dada pela seguinte expressão: $RB = Y * P_g$; b) Margem bruta (MB): em R\$ ha^{-1} , é o resultado da diferença entre a RB e o custo do tratamento (C), dada pela expressão: $MB = RB - C$; c) Índice de lucratividade (IL): em porcentagem, expressa a parte da receita que ficará disponível para futuros investimentos após o pagamento dos custos operacionais (KANEKO *et al.*, 2016), obtido pela expressão: $IL = (MB / RBT) * 100$; d) Ponto de equilíbrio (Pe_q): em $kg ha^{-1}$, é a relação entre o CT e o preço da saca de milho no momento da comercialização, determina quantas unidades produzidas são necessárias para pagar o CT, segundo a expressão: $Pe_q = CT / P$; e) Custo marginal (CM_g): é a resposta obtida, resultado da relação entre a variação no custo (ΔC) e a variação no produto (ΔY) (VASCONCELLOS; GARCIA, 2009). Em outras palavras, é o indicador que considera quanto se eleva o custo para produzir uma unidade a mais do produto. A parcela que contou com a aplicação de potássio via cloreto de potássio foi considerada como indicador para o cálculo do custo marginal (CM_g), calculada pela seguinte expressão: $CM_g = \Delta C / \Delta P_g$.

Sendo assim, é viável e mais interessante do ponto de vista econômico o tratamento que apresentar maior MB e IL, menor Pe_q , pois com valores menores se compensa o gasto com os produtos, e quando o $CM_g < P_g$, pois aumentos na produção elevam a receita e, quando $CM_g \geq P_g$ não se deve aumentar a produção, elevando os custos acima do preço do produto no mercado.

4.2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise da variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e, em casos de significância, as médias foram comparadas entre si pelo teste Tukey com 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico SISVAR[®] (FERREIRA, 2011). Para as variáveis em que não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos, foi efetuado o teste de contraste, para comparar os manejos: KCl x Vinhaça x KCl+Vinhaça.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A planta de milho apresenta crescimento determinado, ou seja, possui um período de crescimento e desenvolvimento vegetativo e posteriormente reprodutivo. A mudança entre a fase vegetativa e reprodutiva ocorre no momento do florescimento/pendoamento,

sendo que, nesse momento a planta já estabeleceu o máximo crescimento e desenvolvimento vegetativo, ou seja, a máxima altura, diâmetro de colmo, massa seca, número de folhas e área foliar. Isto justifica a adubação potássica de cobertura na fase vegetativa da cultura.

Os diferentes tratamentos empregados influenciaram apenas a altura total da planta e o número de folhas, quando observado as características biométricas de crescimento da planta de milho (Tabela 3). É importante destacar que o potássio atua na regulação estomática, além de ser ativador de várias enzimas. Também, atua no crescimento radicular, responsável pela absorção de água e nutrientes; assim, a disponibilidade em sincronia com a demanda da planta, tem reflexo positivo na formação da folhagem e, por conseguinte, todas essas características, refletem no rendimento da cultura do milho.

Tabela 3. Resumo da análise de variância das variáveis biométricas de crescimento da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8)

| FV | GL | AP | AIE | DC | NF | AF |
|-----------|----|---------|---------------------|---------------------|--------|---------------------|
| Manejos | 4 | 0,045** | 0,037 ^{ns} | 3,231 ^{ns} | 1,156* | 0,016 ^{ns} |
| Repetição | 3 | 0,009 | 0,027 | 4,191 | 0,079 | 0,000 |
| Erro | 12 | 0,008 | 0,029 | 2,308 | 0,339 | 0,010 |
| CV (%) | | 4,01 | 15,04 | 7,23 | 4,71 | 11,99 |

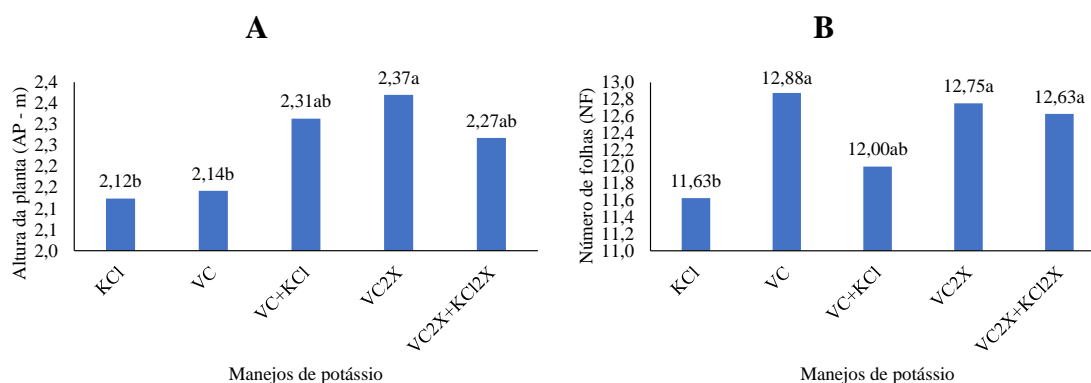
Fonte: Autor (2023).

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; CV (%) = Coeficiente de variação

AP = Altura de planta; AIE = Altura de inserção da espiga; DC = Diâmetro de colmo; NF = Número de folhas; AF = Área foliar

^{ns} = não significativo; * = p<0,05; ** = p<0,01.

A suplementação de potássio via vinhaça concentrada (VC) em duas aplicações (VC2X) promoveu a maior altura de planta, seguido pelos tratamentos de vinhaça+cloreto de potássio (VC+KCl e VC2X+KCl2X) e, por fim os tratamentos isolados de cloreto de potássio (KCl) e vinhaça (VC). Em média, o parcelamento da VC em duas vezes, nos estágios V4 e V8 da cultura do milho, proporcionou aumento de 11,26% (+0,24 metros) na altura da planta em comparação aos tratamentos isolados KCl e VC (Figura 5). A utilização dos manejos VC, VC2X e/ou VC2X+KCl2X proporcionam o maior número de folhas por planta de milho, sendo, em média 0,80 folha a mais por planta produzida com estes manejos.



Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

Figura 5. Altura de planta (AP - A) e número de folhas (NF - B) da planta de milho, cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

As respostas biométricas da cultura do milho são diversas quando submetida a diferentes tratamentos com vinhaça e fertilizantes minerais, pois, diversos fatores, como o híbrido utilizado, o índice pluviométrico e o teor de potássio no solo podem influenciar nestas respostas. A influência no diâmetro de colmo da planta de milho também não foi observada por Silva *et al.* (2019), em que a altura da planta foi afetada pelas diferentes doses de vinhaça, sendo a mais eficiente a de 8,75 m³ ha⁻¹. Em complemento, o contraste entre a adubação mineral de potássio e a utilização da vinhaça não afetaram a altura de planta do milho (SILVA *et al.*, 2016).

A produção de matéria seca de parte aérea das diferentes partes da planta de milho (folha, colmo, espiga e matéria seca total) não foi influenciada pelo uso isolado ao associado de KCl e vinhaça concentrada, e pelo parcelamento da dose dessas fontes de potássio (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância das variáveis de acúmulo de biomassa da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| FV | GL | MSF | MSC | MSE | MST | MSF/MSC |
|-----------|----|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Manejos | 4 | 469,79 ^{ns} | 1487,14 ^{ns} | 461,34 ^{ns} | 4549,23 ^{ns} | 0,092 ^{ns} |
| Repetição | 3 | 533,94 | 403,39 | 1201,17 | 5345,54 | 0,068 |
| Erro | 12 | 1095,23 | 2275,65 | 1229,67 | 6738,29 | 0,167 |
| CV (%) | | 36,85 | 27,60 | 33,56 | 22,36 | |

Fonte: Autor (2023).

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; CV (%) = Coeficiente de variação

MSF = Massa seca da folha; MSC = Massa seca do colmo; MSE = Massa seca da espiga; MST = Massa seca total

^{ns} = não significativo; * = p<0,05; ** = p<0,01.

Assim como a produção de matéria seca, o teor nutricional de potássio não foi influenciado pelo uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8). (Tabela 5). Contudo, conforme as médias apresentadas na Tabela 5, alguns tratamentos apresentaram valores superiores de teor de potássio na folha. Contudo, independentemente da forma de manejo da adubação potássica de cobertura empregada neste estudo (fonte ou parcelamento), os teores de potássio na folha situaram dentro da faixa considerada adequada para a cultura do milho, conforme Cantarella *et al.* (2022), que compreende de 17 a 30 g kg⁻¹ de K. Também, dentro da faixa considerada como adequada por Malavolta *et al.* (1997), que é de 17,5 a 22,5 g kg⁻¹; como da faixa preconizada por Sousa e Lobato (2004), que é de 13 a 30 g kg⁻¹. É importante ressaltar que a amostragem de folhas no presente estudo foi realizada conforme metodologia proposta por Cantarella *et al.* (2022).

Tabela 5. Resumo da análise de variância para o teor nutricional de potássio da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| FV | GL | Teor nutricional de potássio |
|---------------------|--|------------------------------|
| Manejos | 4 | 16,00 ^{ns} |
| Repetição | 3 | 1,65 |
| Erro | 12 | 5,90 |
| CV (%) | | 11,88 |
| | | Médias |
| Tratamento | Teor nutricional de potássio (g kg ⁻¹) | |
| KCl | 18,8 | |
| Vinhaça | 21,0 | |
| Vinhaça+KCl | 20,5 | |
| Vinhaça 2x | 23,5 | |
| Vinhaça 2x + KCl 2x | 18,5 | |

Fonte: Autor (2023).

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; CV (%) = Coeficiente de variação

^{ns} = não significativo; * = p<0,05; ** = p<0,01

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

A prolificidade é uma característica intrínseca à planta de milho, que apesar do melhoramento genético a planta ainda apresenta a possibilidade de produção de mais uma espiga por planta. A prolificidade foi influenciada pelos manejos de potássio, sendo, o único parâmetro produtivo influenciado pelos manejos (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância para os parâmetros produtivos da espiga da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| FV | GL | NEP | NFG | NGF | NGE | DE | CE |
|-----------|----|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| Manejos | 4 | 0,01 ^{**} | 1,06 ^{ns} | 3,60 ^{ns} | 2418,7 ^{ns} | 1,33 ^{ns} | 0,16 ^{ns} |
| Repetição | 3 | 0,00 | 1,26 | 7,63 | 5744,5 | 3,62 | 0,83 |
| Erro | 12 | 0,00 | 2,31 | 7,29 | 7163,1 | 3,43 | 0,54 |
| CV (%) | | 4,31 | 8,69 | 7,27 | 13,00 | 3,75 | 3,95 |

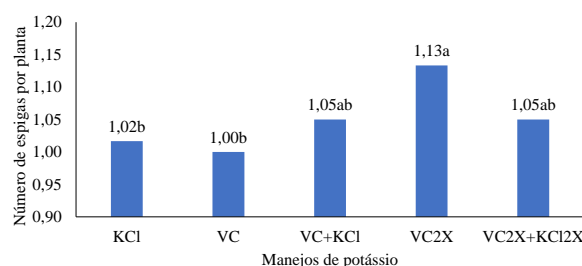
Fonte: Autor (2023).

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; CV (%) = Coeficiente de variação

NEP = Número de espigas por planta; NFG = Número de fileiras de grãos; NGF = Número de grãos por fileira; NGE = Número de grãos por espiga; DE = Diâmetro da espiga; CE = Comprimento da espiga

^{ns} = não significativo; * = p<0,05; ** = p<0,01.

A suplementação de 100% do potássio via vinhaça concentrada em duas aplicações proporcionou o maior valor de prolificidade, seguida pelos tratamentos mistos. Comparado à utilização da VC em apenas uma aplicação, o incremento foi de 0,13 espiga por planta. Apenas a utilização de VC isoladamente em uma aplicação, a planta de milho apresentou apenas uma espiga por planta (Figura 6).



Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

Figura 6. Número de espigas por planta de milho e massa de grãos por planta cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

Tanto para a utilização isolada ou associada das fontes de potássio, o parcelamento da adubação nos estádios V4 e V8 proporcionou maiores valores de altura da planta, número de folhas e número de espigas por planta. Apesar de a capacidade de fixação nos colóides do solo, que faz com que em solos de textura média a argilosa necessite antecipar a aplicação de potássio, este nutriente tem elevado potencial de lixiviação, reduzindo as doses máximas recomendadas a serem aplicadas de forma direta no solo (SANTOS, 2021). Segundo Mendes *et al.* (2016) as perdas podem atingir até 57% do potássio aplicado, quando os volumes acumulados de chuvas atingiram 200% da capacidade de campo do solo.

Em relação às variáveis produtivas massa de grãos por planta (MGPLANTA), massa de mil grãos (MMG) e a produtividade de grãos por hectare, em sacas de 60 kg por hectare (SCHA), o uso isolado ou associado das fontes potássicas, o parcelamento da dose nos estádios V4 e V8, não promoveram influência (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância para a produtividade da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| FV | GL | MGPLANTA | MMG | SCHA |
|---------------------|----|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Manejos | 4 | 1052,18 ^{ns} | 1052,18 ^{ns} | 177,08 ^{ns} |
| Repetição | 3 | 671,64 | 671,64 | 55,53 |
| Erro | 12 | 1145,47 | 1145,47 | 142,41 |
| CV (%) | | 23,16 | 13,17 | 13,17 |
| Médias | | | | |
| Tratamento | | | MMG (gramas) | SCHA |
| KCl | | | 209,73 | 86,98 |
| Vinhaça | | | 228,10 | 97,59 |
| Vinhaça+KCl | | | 193,88 | 85,42 |
| Vinhaça 2x | | | 215,57 | 96,58 |
| Vinhaça 2x + KCl 2x | | | 216,68 | 86,46 |

Fonte: Autor (2023).

FV = Fonte de variação; GL = Grau de liberdade; CV (%) = Coeficiente de variação
 MGPLANTA = Massa de grãos por planta; MMG = massa de mil grãos; SCHA = Quantidade de sacas por hectare
 ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$
 Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade
 KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;
 VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;
 VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;
 VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;
 VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

Diferente de o observado neste estudo, Basso (2013) aplicou a vinhaça como fonte de potássio para o cultivo do milho na região noroeste do Rio Grande do Sul e, observou incremento sobre a produtividade de grãos do milho safrinha na ordem de 26% em comparação ao manejo com uso da adubação mineral.

Portanto, os diferentes manejos com vinhaça concentrada e cloreto de potássio não afetaram de forma significativa no acúmulo de matéria seca, no teor nutricional de potássio, nos parâmetros produtivos e na produtividade de grãos. Neste sentido, os resultados indicam que o teor de potássio no solo e sua disponibilidade, antes da adubação potássica, foi suficiente em fornecer esse nutriente em quantidade necessária para o suprimento adequado da planta de milho (SOKAL *et al.*, 2020). Teores de potássio a partir do nível crítico, sendo 62 mg dm^{-3} , são baixos para a cultura do milho (VIEIRA *et al.*, 2013), contudo, acima de 120 mg dm^{-3} é considerado alto, e não se observa incrementos na produtividade de grãos do milho sob diferentes manejos de potássio (TAKASU *et al.*, 2014), razão pela qual, possivelmente, não foi observada resposta à adubação, independentemente do manejo utilizado (parcelamento da dose e fontes), considerando que o solo possuía o teor alto de potássio, iguais a 4,3 e $3,4 \text{ mmolc dm}^{-3}$, respectivamente, nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade, conforme demonstrado na Tabela 1 (Ítem Material e Métodos). Contudo, alguns estudos observaram respostas produtivas e econômicas da cultura do milho safrinha na região do cerrado, com doses acima de 100% da quantidade recomendada, tanto para a fonte cloreto de potássio como vinhaça concentrada, neste último caso, até 40% acima da dose recomendada (CABRAL FILHO *et al.*, 2020).

Assim como o teor de potássio na folha e os demais parâmetros, quando se observa as médias obtidas nestas variáveis constata-se alguns padrões. Neste sentido, foi executada a análise estatística de contraste, em que os manejos foram agrupados em três classes, sendo: KCl (apenas utilização de cloreto de potássio); VC (apenas a utilização de

vinhaça concentrada) e; KCl+VC (manejo com 50% de cloreto de potássio e 50% de vinhaça concentrada) (Tabela 8).

Portanto, foram efetuadas três análises de contraste para o teor nutricional de potássio e componentes produtivos, sendo: C1 = KCl x VC; C2 = KCl x KCl+VC e; C3 = VC x KCl+VC. O teor de potássio foi diferente quando comparado os manejos KCl x VC e VC x KCl+VC. A produtividade de grãos foi diferente apenas quando comparou os manejos VC x KCl+VC (Tabela 8).

Tabela 8. Contraste entre os tratamentos das médias do teor nutricional de potássio e parâmetros produtivos da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| Contraste | KCl | Vinhaça | Vinhaça2x | Vinhaça+KCl | Vinhaça2x+KCl2x |
|-----------|-----|---------|-----------|-------------|-----------------|
| C1 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 |
| C2 | 2 | 0 | 0 | -1 | -1 |
| C3 | 0 | 1 | 1 | -1 | -1 |

| Contraste | Teor de K | NEP | NFG | NGF | NGE |
|-----------|-----------|-----|-----|-----|-----|
| C1 | * | ns | ns | ns | ns |
| C2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| C3 | * | ns | ns | ns | ns |

| Contraste | DE | CE | MGPLANTA | MMG | SCHA |
|-----------|----|----|----------|-----|------|
| C1 | ns | ns | ns | ns | ns |
| C2 | ns | ns | ns | ns | ns |
| C3 | ns | ns | ns | ns | * |

Fonte: Autor (2023).

Teor de K = Teor de potássio na folha de milho; NEP = Número de espigas por planta; NFG = Número de fileiras de grãos; NGF = Número de grãos por fileira; NGE = Número de grãos por espiga; DE = Diâmetro da espiga; CE = Comprimento da espiga; MGPLANTA = Massa de grãos por planta; MMG = massa de mil grãos; SCHA = Quantidade de sacas por hectare

ns = não significativo; * = p<0,05; ** = p<0,01

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via Cloreto de potássio no estágio fenológico de V4 na cultura do milho;

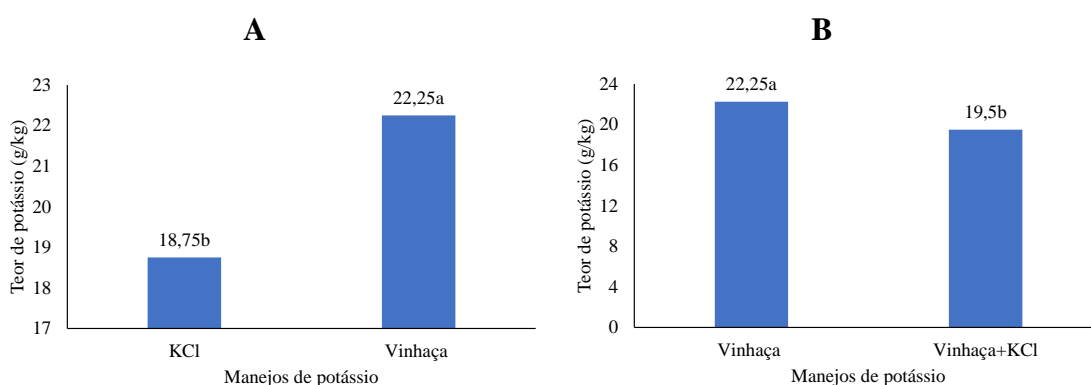
VC = 100% da dose de potássio aplicado via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 na cultura do milho;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 e V8 na cultura do milho;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via Cloreto de potássio e 50% via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 na cultura do milho;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via Cloreto de potássio e 50% via Vinhaça concentrada no estágio fenológico de V4 e V8 na cultura do milho.

Considerando-se o teste de contraste, o teor de potássio nutricional na folha da planta de milho no momento do florescimento foi 18,67% superior quando utilizou a fonte vinhaça concentrada em comparação ao cloreto de potássio, representando 3,5 gramas a mais de potássio por quilograma de matéria seca produzida. Contudo, quando substitui metade da aplicação de KCl por VC, o teor de potássio aumenta, porém, continua inferior ao do manejo apenas com a VC, sendo que, a diferença é de 14,10%, e corresponde a incremento de 2,75 gramas de potássio por quilograma de matéria seca produzida (Figura 7).

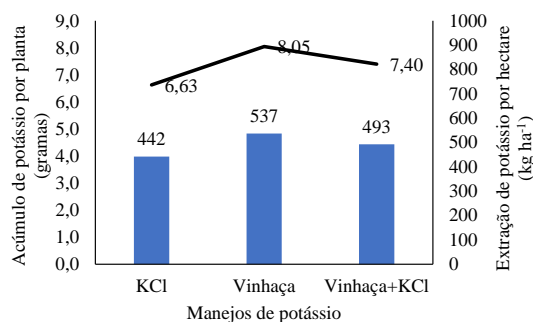


Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Figura 7. Teor de potássio da folha do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

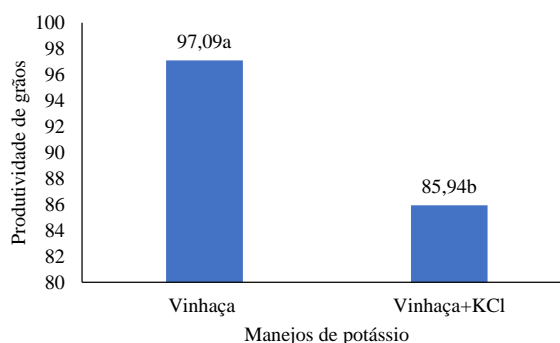
Em complemento aos teores de potássio, não houve efeitos de diluição, ou seja, o acúmulo total de potássio por planta também foi maior no tratamento com a utilização apenas de vinhaça concentrada. A matéria seca total da parte aérea por planta foi de 0,35 kg, 0,36 kg e 0,38 kg quando utilizados os manejos KCl, VC e KCl+VC, respectivamente. Neste sentido, cada planta acumulou 6,63 g, 8,05 g e 7,40 g, resultando em 442 kg, 537 kg e 493 kg de potássio extraído por hectare, quando utilizados os manejos KCl, VC e KCL+VC, respectivamente (Figura 8).



Fonte: Autor (2023)

Figura 8. Acúmulo de potássio na planta e extração total de K por hectare pela cultura do milho, cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

A produtividade de grãos também foi superior quando utilizada apenas a VC em comparação ao uso associado (KCl + VC), na ordem de 13%, equivalente a 11,2 sacas de 60 kg a mais produzidas por hectare (Figura 9).



Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Figura 9. Produtividade de grãos do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

O aumento significativo do teor de potássio na folha, do acúmulo de potássio na planta e da produtividade de grãos por hectare, em decorrência da utilização da vinhaça concentrada, em contraste com o cloreto de potássio, pode estar relacionado, além das características adicionais que a vinhaça contém, principalmente ao teor de matéria orgânica e outros nutrientes. A fonte cloreto de potássio também apresenta alguns pontos

negativos, por ser uma fonte com alto índice salino, em virtude disto, sua aplicação aumenta o potencial osmótico da solução do solo, dificultando a absorção da água, ou mesmo aumentando a absorção de K e Cl, que em grandes quantidades pode ser tóxicos (BORKERT *et al.*, 2005). Alta disponibilidade no solo X competição por sítios de adsorção)

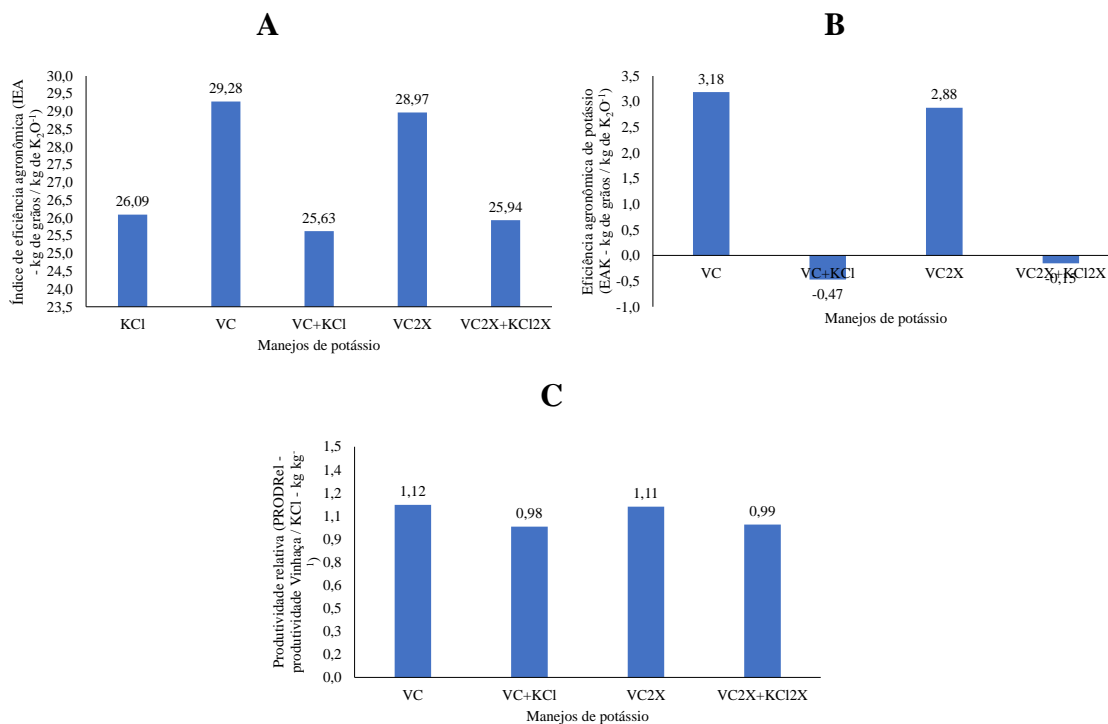
Conforme os resultados observados no contraste entre os manejos com cloreto de potássio, vinhaça concentrada ou associado, a vinhaça concentrada pode ser utilizada em complementação e/ou substituição ao cloreto de potássio na cultura do milho, como foi evidenciado também por Pinto (2019).

O potássio desempenha importantes funções fisiológicas, químicas e enzimáticas na planta de milho, neste sentido, a maior disponibilidade e/ou equilíbrio de potássio no solo proporciona maior teor e acúmulo de potássio na planta de milho. Consequentemente, maiores quantidades do nutriente estarão disponíveis para os processos de estimulação de enzimas, fotossíntese, regulação da pressão osmótica, movimento dos estômatos, síntese de proteínas, transporte do floema, transferência de energia e melhora a resistência contra o estresses (MARSCHNER, 2012).

Diversos autores trabalhando com a cultura do milho submetido a diferentes manejos com potássio observaram que a boa nutrição com este nutriente proporcionou aumentos nas variáveis de crescimento da planta, no acúmulo de matéria seca e na produtividade de grãos (AKRAM *et al.*, 2010; KUBAR *et al.*, 2013; ADNAN *et al.*, 2020).

O índice de eficiência agronômica representa a quantidade de quilogramas de grãos produzidos para cada quilograma de potássio fornecido em cada manejo. Destaca-se que o manejo somente com a VC apresentou os maiores valores de eficiência agronômica, em média 29 kg de grãos por quilograma de potássio fornecido. Quando comparado aos manejos que tinham cloreto de potássio, o manejo somente com a vinhaça concentrada produziu em média 3 kg de grãos a mais para cada quilograma de potássio fornecido (eficiência agronômica de potássio) (Figura 10).

Destaca-se que com a utilização do uso associado de KCl e Vinhaça concentrada, obteve-se a eficiência agronômica de potássio inferior ao manejo com 100% de KCl, na ordem de -0,3 kg de grãos produzidos para cada quilograma de potássio fornecido nestes manejos (Figura .10a).



Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

Figura 10. Índice de eficiência agrônômica (IEA – kg de grãos⁻¹ / kg de K₂O⁻¹), eficiência agrônômica de potássio (EAK) e produtividade relativa (PRODRel - produtividade de Vinhaça / KCl – kg kg⁻¹) da planta de milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

Adotando-se como referência a utilização de cloreto de potássio, a produtividade relativa dos manejos apenas com a vinhaça concentrada foram superiores a 1,0, ou seja, os manejos apenas com VC produziram cerca de 1,15 kg de grãos para cada 1,0 kg de grãos produzidos no manejo apenas com KCl. Já os manejos mistos apresentaram produtividade relativa inferior a 1,0, quando comparado ao manejo apenas com o KCl (Figura 10).

Em relação ao rendimento equivalente da fonte de potássio, para fornecer 1 kg de K₂O por hectare é necessário aplicar 1,67 kg de KCl ou 100 litros de VC por hectare.

Independente do tratamento (vinhaça ou KCl em uso isolado ou combinado com e sem parcelamento da dose), foram aplicados 200 kg de K₂O por hectare. Portanto, quando observada a produtividade média de grãos, o manejo apenas com KCl possui um rendimento equivalente da fonte de 0,06 kg (60 gramas) de KCl para produzir 1 kg de grãos por hectare, enquanto no caso dos manejos apenas com VC é necessário 3,43 litros de VC para produzir 1 kg de grãos por hectare. Já nos manejos com uso associado destas duas fontes, o rendimento equivalente da fonte KCl foi igual, ou seja, 60 gramas, já no caso da VC seu rendimento foi reduzido, sendo necessários 3,88 litros de VC para produzir 1 kg de grãos por hectare.

A vinhaça apesar de ser um resíduo orgânico da produção do etanol de cana-de-açúcar, a concentração gera custos de produção; neste caso, o custo médio para a concentração, transporte e aplicação foi de R\$ 25,00 o metro cúbico. O valor do cloreto de potássio no período de janeiro a outubro de 2023 foi de R\$ 2.400,00 a tonelada aplicada por hectare. A utilização da VC custou R\$ 300,00 a menos por hectare, já no caso do manejo associado a redução foi de R\$ 150,00. Vale destacar que o cálculo do custo por hectare foi considerado apenas o valor de aquisição e aplicação das fontes, pois os demais manejos foram padrão para todos os tratamentos (Tabela 9).

Tabela 9. Análise econômica da cultura do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| Tratamentos | Quantidade aplicada | | Custos por fonte | | Custos dos tratamentos |
|---------------------|---------------------|---------------------------------|----------------------------|---------|------------------------|
| | KCl | Vinhaça | KCl | Vinhaça | |
| | t ha ⁻¹ | m ³ ha ⁻¹ | -- R\$ ha ⁻¹ -- | | R\$ ha ⁻¹ |
| KCl | 0,33 | 0,00 | 799,99 | 0,00 | 799,99 |
| Vinhaça | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 500,00 | 500,00 |
| Vinhaça+KCl | 0,17 | 10,00 | 400,01 | 250,00 | 650,01 |
| Vinhaça 2x | 0,00 | 20,00 | 0,00 | 500,00 | 500,00 |
| Vinhaça 2x + KCl 2x | 0,17 | 10,00 | 400,01 | 250,00 | 650,01 |

Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

A receita bruta (RB) leva em consideração apenas a venda do produto, desse modo os tratamentos com maior produtividade de grãos apresentam a maior RB, neste caso, os

manejos apenas com VC, seguido por KCl e os manejos associados. A RB do manejo apenas com VC foi em média R\$ 638,00 superior aos demais tratamentos.

Descontando os custos de cada tratamento (Tabela 9) da RB, obtém-se a margem bruta (MB), assim sendo, os manejos apenas com VC apresentaram a maior MB, seguido por KCl e os manejos associados. Contudo, a diferença de valores foi maior, devido as distinções entre os custos de aplicação, em que a MB do manejo apenas com VC foi em média R\$ 847,00 superior aos demais tratamentos.

O custo marginal (CMg) é a resposta obtida e representa o resultado da relação entre a variação no custo e a variação no produto, portanto, é o indicador que considera quanto se eleva o custo para produzir uma unidade a mais do produto. A parcela que contou com a aplicação de potássio via cloreto de potássio foi considerada como indicador para o cálculo do custo marginal. No caso dos manejos apenas com a VC, é necessário elevar o custo em menos de R\$ 1,0 por hectare para elevar a produtividade de grãos em 1,0 kg por hectare. Já os tratamentos mistos, devido a produtividade de grãos média por hectare ter sido inferior ao tratamento padrão apenas com KCl, o seu CMg foi negativo.

Percentualmente, da RB após descontar os custos dos tratamentos, tem-se o índice de lucratividade (IL), que expressa a parte da receita que ficará disponível para futuros investimentos após o pagamento dos custos operacionais. O manejo com VC apresentou IL superior a 90%, já para os manejos mistos foi superior a 85% e, o manejo apenas com KCl, foi inferior a 85%.

Uma informação importante é refetente à quantidade de produto que deve ser produzido para pagar os custos com o tratamento, neste caso, a quantidade de quilogramas de grãos que deve ser produzida apenas para pagar o custo de aplicação dos manejos. Esta informação é representada pelo ponto de equilíbrio (P_{eq}). Nos manejos apenas com VC, é necessário produzir apenas 9 sacas de 60 kg de grãos de milho por hectare. Quando se utiliza o manejo misto o P_{eq} é de 11 sacas e, quando utilizado o manejo apenas com KCl é de 14 sacas por hectare.

Por último, foi analisada a rentabilidade dos manejos em comparação ao manejo padrão de KCl, ou seja, o quanto a mais em R\$ por hectare é obtido quando utilizado os demais manejos em comparação ao KCl. Assim sendo, em média o manejo misto rentabiliza a mais por hectare o valor de R\$ 89,00 e, o manejo apenas com a VC, R\$ 891,00, representando 2 e 15 sacas de 60 kg de milho a mais por hectare que o produtor ganharia em renda, respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10. Análise econômica da cultura do milho cultivada sob o uso isolado e associado da adubação potássica com cloreto de potássio e vinhaça concentrada, com e sem parcelamento da dose (estádios fenológicos V4 e V8).

| Tratamentos | Custos dos tratamentos | Rendimentos médios | RB | MB | CM _g | IL | Peq | Rent |
|---------------------|------------------------|---------------------|----------------------------------|----------|-----------------|-------|---------------------|--------|
| | R\$ ha ⁻¹ | kg ha ⁻¹ | ----- R\$ ha ⁻¹ ----- | | | % | kg ha ⁻¹ | |
| KCl | 799,99 | 5.219 | 5.088,16 | 4.288,17 | - | 84,28 | 820,50 | - |
| Vinhaça | 500,00 | 5.856 | 5.709,23 | 5.209,23 | 0,78 | 91,24 | 512,82 | 921,06 |
| Vinhaça+KCl | 650,01 | 5.125 | 4.997,27 | 4.347,27 | -6,97 | 86,99 | 666,67 | 59,09 |
| Vinhaça 2x | 500,00 | 5.795 | 5.649,81 | 5.149,81 | 0,87 | 91,15 | 512,82 | 861,64 |
| Vinhaça 2x + KCl 2x | 650,01 | 5.188 | 5.058,02 | 4.408,01 | -21,02 | 87,15 | 666,67 | 119,84 |

Fonte: Autor (2023).

Letras distintas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

KCl = 100% da dose de potássio aplicado via KCl em V4;

VC = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4;

VC2X = 100% da dose de potássio aplicado via VC em V4 e V8;

VC+KCl = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4;

VC2X+KCl2X = 50% da dose de potássio aplicado via KCl e 50% via VC em V4 e V8.

Analisando os aspectos econômicos, é mais interessante o manejo que apresentar as seguintes condições: maior MB e IL e, menor Peq, pois com valores menores se compensa o gasto com os produtos; quando o $CM_g < P_g$, pois aumentos na produção elevam a receita e; quando $CM_g \geq P_g$ não se deve aumentar a produção, elevando os custos acima do preço do produto no mercado.

Portanto, devido ao custo dos manejos reduzido, mesmo aqueles com KCl, em relação à receita obtida pelo produto, todos os tratamentos apresentaram $CM_g < P_g$, indicando que o aumento da produtividade através do investimento nestes manejos é viável, ao ponto que o CM_g é baixo, e o seu custo é inferior ao preço do produto. Contudo, os manejos apenas com VC foram os que apresentaram maior margem bruta e índice de lucratividade e, o menor ponto de equilíbrio. Ou seja, neste manejo, pouco se gasta e muito se produz, comprometendo pequena parte da produção para pagar os custos do manejo.

De maneira geral, é possível observar que o uso de vinhaça compreende uma oportunidade de prática de manejo para a suplementação de K ao milho e outras culturas. Também, é importante sob aspectos econômicos e ambientais, uma vez que se promove a reciclagem de nutrientes e a destinação mais adequada desse resíduo, o que é muito

importante para o Brasil que é o maior produtor de cana-de-açúcar e etanol e ao mesmo tempo grande importador de fontes minerais de potássio.

4.4 CONCLUSÕES

A utilização da vinhaça concentrada equivalente a 100% a da recomendação de adubação potássica, na forma de cloreto de potássio para a cultura do milho proporciona maior altura da planta e maior número de folhas.

A prolificidade da planta de milho é estimulada quando utilizada a vinhaça concentrada parcelada nos estádios quatro e oito folhas expandidas.

A substituição total da adubação potássica via cloreto de potássio pela vinhaça concentrada, parcelada em uma ou duas aplicações, proporciona maior teor de potássio na folha da planta de milho.

A suplementação de potássio via cloreto de potássio associada à vinhaça concentrada não beneficia a produtividade de grãos de milho, sendo recomendado a utilização isolada de apenas cloreto de potássio ou de vinhaça concentrada.

A utilização de 100% do potássio via vinhaça concentrada proporciona a maior eficiência agrônômica do nutriente.

A utilização da vinhaça concentrada proporciona aumento de 3 kg de grãos produzidos por quilograma de potássio fornecido em comparação à eficiência agrônômica do cloreto de potássio.

A cada quilograma de grãos produzidos pela fonte de cloreto de potássio a vinhaça concentrada proporciona a produção de 1,11 kg.

A rentabilidade dos manejos com 100% de utilização de vinhaça concentrada é próxima de R\$ 890,00 por hectare, em comparação ao manejo com cloreto de potássio.

Não é interessante do ponto de vista agrônômico, produtivo e econômico o manejo com suplementação mista, sendo 50% via cloreto de potássio sólido e 50% via vinhaça concentrada fertirrigação. Contudo, este tipo de manejo não deve ser descartado, em casos quando houver dificuldade em adquirir e aplicar grandes quantidade de vinhaça. Isto posto, mais estudos devem ser realizados para analisar o manejo misto através do enriquecimento da vinhaça concentrada com cloreto de potássio, que pode proporcionar efeitos benéficos.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADNAN, M. Role of Potassium in Maize Production: A Review. *Op Acc J Bio Sci & Res*, v.3, n.5, 2020.

ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. D. M., & SPAROVEK, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

AKRAM, M.; ASHRAF, M. Y.; AHMAD, R.; RAFIQ, M.; AGMAD, I.; IQBAL, J. Alometria e componentes de rendimento de híbridos de milho (*Zea Mays* L.) a vários níveis de potássio em condições salinas. *Arch Biol Sci*. v.62, n.4, p.1053-1061, 2010.

BASSO, C. J.; SANTI, A. L.; LAMEGO, F. P.; SOMAVILLA, 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*, n. 43, v.4, p.596-602, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000400006>

CABRAL FILHO, F. R. Desempenho agrônomo e balanço nutricional na planta de milho fertirrigado com vinhaça concentrada e cloreto de potássio. **Mestrado em Ciências Agrárias –Agronomia**, Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, Goiás, Brasil, p.106 f, 2019.

COELHO, A. M. O potássio na cultura do milho. In: Yamada, T.; Roberts, T. L. (Ed.). Simpósio sobre potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**, p.610-658, 2005.

COELHO, J. D. Milho: Produção e Mercado. **Caderno Setorial ETENE**, v.6, n.182, 2021.

(CONAB) Companhia Nacional de Abastecimento (a). Análise Mensal: **Milho**. Junho/Julho, 2023.

(CONAB) Companhia Nacional de Abastecimento (b). Produção agrícola: Custos de produção. **Milho segunda safra**. Janeiro, 2023.

(CONAB) Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção de grãos é estimada em 272,5 milhões de toneladas com clima favorável para as culturas de 2ª safra**. 2022.

FERREIRA, A. C. **Fisiologia e morfologia de plantas de feijão sob deficiência hídrica**. 2017. 62 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP, 2017.

FERREIRA, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e agrotecnologia**, n.35. v.6, p.1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

FRANCISCHINI, R.; SILVA, A.G. da; TESSMANN, D.J. Eficiência de bioestimulantes e fungicida nos caracteres agronômicos e econômicos na cultura do milho verde. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 17, n.2, p. 274-286, 2018. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v17n2p274-286.

KANEKO, F. H.; SABUNDJIAN, M. T.; ARF, O.; LEAL, A. J. F.; CARNEIRO, L. F.; PAULINO, H. B. Análise econômica do milho em função da inoculação com *Azospirillum*, fontes e doses de N em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.15, n.2, p.202-216, 2016. doi: 10.18512/1980-6477/rbms.v15n2p202-216.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: **Verlag Justus Perthes**. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

KUBAR, S.; SHAH, A. N.; RAJPAR, I.; QURESHI, S. A. Resposta do milho a um novo fertilizante orgânico de potássio desenvolvido a partir de resíduos de frutas e vegetais. **Pak J Agri Sci**, v.29, n.1, p.1-12, 2013.

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: Segato, S.V.; Pinto, A.S.; Jendiroba, E.; Nóbrega, J.C.M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Editorial 2006. p.369-375.

MARTIN, N.B.; SERRA, R.; ANTUNES, J.F.G.; OLIVEIRA, M.D.M.; OKAWA, H. Custos: sistemas de custo de produção agrícola. **Informações Econômicas**, v.24, n.9, p.97-122, 1998.

MARSCHNER, P. M. **Nutrição Mineral de Plantas Superiores**, 3ª ed., Imprensa Acadêmica, Londres, Reino Unido, 2012.

PINTO, L. E. V. Vinhaça como biofertilizante para fornecimento de potássio a soja com sucessão de milho e capim e impactos sobre o solo. **Tese Doutorado em Agronomia**, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, p.123, 2019.

SANTOS, H. G. dos, JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C. dos, OLIVEIRA, V. A. de, LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A. de, ARAUJO FILHO, J. C. de, OLIVEIRA, J. B. de, CUNHA, T. J. F. (2018). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 5 ed. ver. amp.

SANTOS, L. J.; **Polihalita como fonte de potássio na adubação do sistema de sucessão soja-milho**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias – Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde, Rio Verde – GO, 2021.

Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (SEAPA). **Radiografia do Agro**. Governo de Goiás. Edição 4, 2023.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 39, n.2, p.172-179, 2016.

SILVA, A.; RUIZ, J. G. C.; VIANA, L. M.; VIANA, L. M. RESPOSTA DA CULTURA DO MILHO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA COMO FONTE DE POTÁSSIO. Campo Digit@l: **Revista Ciências Exatas e da Terra e Ciências Agrárias**, v.14, n.1, p.40-46, jul./dez., 2019.

SILVA, S. F.; Garcia, G. O.; Reis E. F.; Dalvi L. P. Uso agrícola da vinhaça para produção de forragem de milho durante três anos de cultivo. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, Irriga & inovagri, p. 59-69, 2016.

SOKAL, T. F.; ROSA, E. F. F.; KASEKER, J. F.; CARLOS, S. S.; BERETA, S. F.; SANTOS, M. C.; NOHATTO, M. A. Avaliação agrônômica e econômica do uso de fertilizantes potássicos na cultura do milho. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável (RBAS)**, v.10, n.1, p. 261-269, Dezembro, 2020.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds). Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica/Embrapa-CPA**, 2004. 416 p.

TAKASU, A. T.; HAGA, K. I.; RODRIGUES, R. A. F. et al. Produtividade da cultura do milho em resposta à adubação potássica. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.13, n.2, p.154-161, 2014.

VASCONCELLOS, M. A. S.; GARCIA, M. E. **Fundamentos de Economia**. 3ª ed. São Paulo: Editora Saraiva. 2009, 245p.

VIEIRA, R. C.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n.1, p.188-198, 2013.