

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”

Parâmetros de transporte do íon potássio via aplicação de vinhaça em solos
condicionados com *biochar* de cana-de-açúcar

Jorge Nascimento Gustavo Junior

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em ciência. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

PIRACICABA
2022

Jorge Nascimento Gustavo Junior
Bacharel em Engenharia Agrônômica

Parâmetros de transporte do íon potássio via aplicação de vinhaça em solos condicionados com
biochar de cana-de-açúcar

Orientador
Prof. Dr **JARBAS HONORIO DE MIRANDA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em ciência. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

PIRACICABA
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Gustavo Junior, Jorge Nascimento

Parâmetros de transporte do íon potássio via aplicação de vinhaça em solos condicionados com *biochar* de cana-de-açúcar / Jorge Nascimento Gustavo Junior. - - Piracicaba, 2022.

75 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Biochar* 2. Parâmetros de transporte 3. Potássio 4. Vinhaça L. . I.
Título

DEDICATÓRIA

Dedico

A minha mãe, Lana Brasil, pelo esforço e dedicação para que eu alcançasse cada objetivo e realizasse cada sonho da minha vida até aqui.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me permitir chegar até aqui com saúde e sabedoria;

Aos meus pais, Jorge e Lana, pelo amor e dedicação na minha criação;

Aos meus irmãos de sangue e irmãos de vida;

Ao professor Jarbas Honório, pela parceria e ensinamentos ao longo da nossa trajetória;

Ao professor Paulo Libardi, pelas conversas enriquecedoras no café;

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, pela oportunidade e estrutura para realização do mestrado;

Ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) pela bolsa de estudos;

À minha orientadora do PET solos durante a graduação, Ana Maria Moreau e à professora Adriana Mendes, pelas oportunidades e aprendizados proporcionados;

Aos meus colegas/amigos que dividiram momentos comigo na ESALQ ao longo da minha trajetória, Evellyn Freire, Ícaro Galvão, Aline Martinelli, Bruna Queiroz, Isabela Klefenz; Janderson Pedro, Matheus Poletto; Thais Pessoa, Tamires Teles, Thairis Santos;

Aos meus amigos da república com quem passei bons momentos, Fábio, Jorge, Henrique, Raphael, Ícaro e Eduardo;

Aos amigos que fiz em Piracicaba fora da ESALQ, Diego, Gustavo Fabre, Vinicius e os demais que tornaram minha estadia em “Pira” muito mais fácil.

EPÍGRAFE

“As pessoas não vão lembrar do que você falou, provavelmente vão lembrar do que você fez, mas algo que elas nunca esquecerão é a sensação que sentiram quando estavam na sua presença. Por isso, emane boas energias por onde passar.”

Adaptado de Savyo Maia

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURA	9
LISTA DE TABELAS	10
1. INTRODUÇÃO	11
1.1. OBJETIVO PRINCIPAL.....	12
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1. CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	13
2.2. ASPECTOS DO PROCESSO PRODUTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	13
2.2.1. <i>Transformação da cana-de-açúcar em etanol e açúcar</i>	13
2.2.2. <i>Vinhaça</i>	14
2.2.3. <i>Bagaço de cana-de-açúcar</i>	15
2.2.4. <i>Torta de filtro</i>	15
2.3. ASPECTOS SOBRE O <i>BIOCHAR</i>	16
2.4. ÍON POTÁSSIO NO SOLO.....	17
2.5. DINÂMICA DE SOLUTOS NO SOLO.....	18
2.5.1. <i>Parâmetros de transporte de solutos no solo</i>	18
2.5.2. <i>Ajuste numérico de Breakthrough Curves (BTC's)</i>	20
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1. LOCAL DO EXPERIMENTO.....	22
3.2. OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE SOLO.....	22
3.3. OBTENÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DO <i>BIOCHAR</i> AO SOLO.....	23
3.4. OBTENÇÃO E APLICAÇÃO DE VINHAÇA AOS TRATAMENTOS.....	25
3.5. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSPORTE DO ÍON POTÁSSIO.....	26
3.5.1. <i>Montagem das Breakthrough curves</i>	26
3.5.2. <i>Ajuste numérico das Breakthrough curves pelo modelo STANMOD</i>	27
3.6. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
3.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. EFEITOS DO <i>BIOCHAR</i> NAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO SOLO.....	31
4.2. PARÂMETROS DE TRANSPORTE E <i>BREAKTHROUGH CURVES (BTC's)</i> DO ÍON POTÁSSIO.....	35
4.2.1. <i>Fator de Retardamento (R)</i>	35
4.2.2. <i>Número de Peclet (P) e Coeficiente de dispersão (D)</i>	43
4.2.2.1. Efeito do biochar no número de Peclet.....	44
4.2.2.2. Efeito do biochar no coeficiente de dispersão.....	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	50
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
5.2. CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

RESUMO

Parâmetros de transporte do íon potássio via aplicação de vinhaça em solos condicionados com *biochar* de cana-de-açúcar

A busca por sistemas de produção agrícola sustentáveis é tema de destaque no atual contexto mundial e sua implementação demanda tecnologias que proporcionem a reutilização racional de resíduos agrícolas, de modo a promover melhorias no solo, proteção de recursos hídricos, redução da emissão de gases de efeito estufa, dentre outros fatores. Nesse contexto, o Brasil ocupa lugar de destaque, como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, cuja cadeia produtiva gera diversos resíduos tais como: vinhaça, bagaço e torta de filtro. E que uma vez utilizados indiscriminadamente podem representar um problema econômico e ambiental. O potássio é o principal nutriente da composição química da vinhaça, possuindo potencial de uso como fertilizante, porém, diante de uma aplicação inadequada às plantas, pode vir a contaminar corpos hídricos e águas subterrâneas, bem como, reduzir a sua eficiência de aproveitamento pelas plantas nessas condições. No caso do bagaço de cana e a torta de filtro, diante de estudos recentes, comprova-se o potencial de uso dessas matérias primas ao serem pirolisadas e convertidas em *biochar*, um tipo de carvão vegetal que, quando incorporado ao solo, apresenta a capacidade de promover melhorias em suas propriedades físico-químicas. Sendo assim, a hipótese da presente pesquisa é que a aplicação de *biochars* oriundo de tais matérias primas, pirolisadas em diferentes temperaturas e incubadas ao solo em diferentes tempos de duração são capazes de promover melhorias físico-químicas no solo. Nesse sentido, o principal objetivo dessa pesquisa foi avaliar a dinâmica do íon potássio em um solo representativo da região canavieira de Piracicaba, SP, incorporado com *biochar*, por meio da obtenção de parâmetros de transporte do íon potássio, mediante a elaboração e ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's). Foram utilizados diferentes tipos de *biochar* (matérias primas de bagaço de cana-de-açúcar (B) e torta de filtro (T)), sob diferentes pirólises (250 °C e 450 °C) e diferentes tempos de incubação (0 e 2 meses). Os parâmetros de transporte do K⁺ aplicado via vinhaça, avaliados, foram: fator de retardamento (R), *Peclet number* (P) e coeficiente de dispersão (D). Tais parâmetros foram obtidos mediante o ajuste numérico das BTC's, em colunas condicionadas com diferentes tipos de *biochar* e tempos de incubação, além das colunas controle (sem *biochar*). Os dados foram ajustados pelo modelo STANMOD (*STudio of ANalytical MODels*) e os parâmetros foram submetidos à uma análise de variância em esquema fatorial triplo (2 x 2 x 2) e quando constatadas significância no teste F a 5% de probabilidade os resultados foram desdobrados e submetidos ao teste de Tukey (p≥0,05). Pelos resultados obtidos, notou-se uma melhoria química no solo, com o aumento nos teores de fósforo disponível superiores a 300% em relação ao solo natural. Além disso, elevações de 17 % na CTC do solo também foram obtidas. O pH do solo foi incrementado em todos os tratamentos aos 2 meses de incubação, cabendo ressaltar que em ambos os períodos de incubação, os demais *biochars* promoveram aumento nos teores de matéria orgânica do solo. Em termos físicos pode-se dizer que a densidade do solo nas colunas foi significativamente reduzida naquelas condicionadas com os *biochar*. Apesar de todas essas alterações promovidas pela aplicação do *biochar*, não foram encontradas diferenças estatísticas nos parâmetros de transporte do íon potássio obtidos quando foram comparadas as colunas condicionadas com *biochar* com aquelas que não foram condicionadas. Em termos de fator de retardamento os valores variaram de 1,25 a 1,11, respectivamente, indicando uma baixa interação do potássio com solo. Os valores médios do *Peclet number* variaram de 5,34 a 22,77 indicando que o transporte de potássio no solo, por difusão, nessas condições do estudo foi quase que desprezível em relação ao transporte convectivo-dispersivo. O coeficiente de dispersão, indicador da “distribuição” do K⁺ no solo, variou de 0,52 cm² min⁻¹ a 5,05 cm² min⁻¹. Embora os parâmetros obtidos nos tratamentos não tenham se diferido do controle, foram notadas diferenças significativas nos parâmetros D e P entre as combinações dos diferentes fatores. Diante dos resultados obtidos pode-se inferir que o *biochar* pode ser um importante aliado no processo de melhoria da qualidade físico-química do solo. Contudo, ressalta-se que estudos envolvendo a elaboração de BTC's e aplicação do modelo STANMOD em outras condições fazem-se necessários para melhor elucidação da relação dos *biochars* com os parâmetros de transporte do íon potássio proveniente da vinhaça.

Palavras-chaves: Biochar, dinâmica de potássio, parâmetros de transporte, STANMOD, *Peclet number*, Fator de Retardamento.

ABSTRACT

Potassium transport parameters for vinasse application to soils amended with biochar produced from sugarcane wastes.

The development of sustainable agricultural production systems is currently of utmost worldwide. The implementation of such systems often involves the reuse of agricultural wastes for soil improvement, water resources protection, reduction of greenhouse gases emissions, among other uses. However, the use of waste streams without criteria or control can lead to be environmental and economic issues. As the biggest sugarcane producer in the world, with waste streams such as vinasse, sugarcane bagasse and filter cake, Brazil has an important role to play. Potassium is the main chemical element in vinasse, therefore, it has potential use as a fertilizer. However, if it is misapplied to soil, it can contaminate surface water or groundwater, as well as reducing its use by the plants. Recent research has shown that sugarcane bagasse and filter cake have great potential to be transformed in biochar, a type of vegetal charcoal, that, when applied to soil, has the capacity to enhance many soil properties. The main hypothesis of this research is that sugarcane-based biochar, produced at different temperatures and incubated in soil for different periods is able to promote soil physicochemical improvements. The main objective of this work was to assess potassium ion dynamics in a biochar-amended soil of Piracicaba, a traditional region of sugarcane production in Brazil, by obtaining potassium's transport parameters, through numerical fitting of Breakthrough Curves (BTC's). Biochar produced from sugarcane bagasse (B) or filter cake (T), at three temperatures (250 °C and 450 °C) and two incubation periods (0 and 2 months) were used to evaluate transport parameters for potassium applied via vinasse. The selected parameters, retardation factor (R), Peclet number (P) and dispersion coefficient (D), were obtained by numerically fitting BTC's, in soil columns amended with different types of biochar and incubation periods. The data were fitted by the STANMOD model (STudio of ANalytical MODels) and the parameters were submitted to analysis of variance in a triple factorial scheme (2 x 2 x 2). When significance was found in the F test at a 5% probability, the treatments were compared pairwise using the Tukey test ($p \geq 0.05$). The results are indicative of an increase in available phosphorus levels greater than 300% in relation to the natural soil. In addition, soil CEC was elevated by 17%. Soil pH was increased in all treatments for biochar incubated for 2 months. For both incubation periods, all biochars promoted an increase in soil organic matter content. Soil density in column amended with biochar was significantly reduced. Despite all these changes promoted by the application of biochar, no statistical differences were found in the potassium ion transport parameters obtained when the biochar amended columns were compared with unamended columns. The retardation factor ranged from 1.11 to 1.25, indicating a low interaction of potassium with soil. The average Peclet number values ranged from 5.34 to 22.77, indicating that the transport of potassium in the soil, by diffusion, under these conditions of the study was almost negligible in relation to the convective-dispersive transport. The dispersion coefficient, an indicator of the "distribution" of K^+ in the soil, varied from $0.52 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$ to $5.05 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$. Although the parameters obtained in the treatments did not differ from the control, significant differences were observed in the D and P parameters between the combinations of the different factors. In view of the results obtained, it can be inferred that biochar can be an important resource in the process of improving the physical-chemical quality of the soil. However, more studies involving the elaboration of BTC's and application of the STANMOD model in other conditions are necessary to better elucidate the relationship of biochars with the transport parameters of potassium ion from vinasse.

Key words: Biochar, potassium dynamics, transport parameters, STANMOD, Peclet number, retardation factor.

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Processo de saturação das diferentes combinações de solo com biochar (a) e incubação dos conjuntos (b).	24
Figura 2. Teor de nutrientes (a), Matéria orgânica (b), Capacidade de troca catiônica (b), relação C:N (d) e Capacidade de retenção de água (d) dos <i>biochars</i> produzidos a partir da torta de filtro (T) e bagaço de cana-de-açúcar (B) em diferentes temperaturas de pirólise (250 °C e 450°C).	25
Figura 3. Esquema para elaboração de Breakthrough Curves visando obtenção de parâmetros de transporte de nutrientes aplicados via vinhaça.....	27
Figura 4. Seleção do código na interface do STANMOD.....	28
Figura 5. Seleção das condições de contorno (<i>number of data points</i> varia de acordo com o número de dados coletados durante a elaboração de cada BTC).....	28
Figura 6. Chute inicial dos parâmetros a serem obtidos.	29
Figura 7. Inserção de dados referentes ao volume de poros e respectivas concentrações relativas obtidos experimentalmente	29
Figura 8. Variações percentuais positivas e negativas nos teores de macronutrientes em relação ao controle para solos condicionados com <i>biochar</i> de bagaço de cana (B) e torta de filtro (T), pirolisados a 250 e 450 °C, com diferentes tempos de incubação ao solo, 0 (M0) e 2 meses (M2).	32
Figura 9. Variações percentuais (conteúdo de micronutrientes (a), atributos químicos (b) e matéria orgânica do solo (d)) e unitárias (pH (c)) em relação ao controle para solos condicionados com <i>biochar</i> de bagaço de cana (B) e torta de filtro (T), pirolisados a 250 e 450 °C, com diferentes tempos de incubação ao solo, 0 (M0) e 2 meses (M2).....	34
Figura 10. <i>Breakthrough curves</i> do íon potássio no tratamento controle (sem <i>biochar</i>) em triplicata.	36
Figura 11. <i>Breakthrough curves</i> do íon potássio nos tratamentos B_250_M0 (a, b, c) e B_450_M0 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.....	38
Figura 12. <i>Breakthrough curves</i> do íon potássio nos tratamentos T_250_M0 (a, b, c) e T_450_M0 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.....	39
Figura 13. <i>Breakthrough curves</i> do íon potássio nos tratamentos B_250_M2 (a, b, c) e B_450_M2 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.....	40
Figura 14. <i>Breakthrough curves</i> do íon potássio nos tratamentos T_250_M2 (a, b, c) e T_450_M2 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.	41
Figura 15. Comparação entre as <i>Breakthrough curves</i> melhor ajustadas (R^2) em M0 (a) e M2 (b).	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização físico-química inicial do solo	22
Tabela 2. Caracterização físico-química inicial do biochar de torta de filtro (indicados com a letra “T”) e bagaço de cana-de-açúcar (indicados com a letra “B”) produzidos em diferentes temperaturas de pirólise.	23
Tabela 3. Caracterização físico-química inicial da vinhaça.	26
Tabela 4. Densidade média (ρ_s) das colunas preenchidas de cada tratamento.	26
Tabela 5. Fatores e níveis de tratamentos e suas respectivas siglas.	30
Tabela 6. Esquema experimental em DIC das combinações dos fatores Matéria-prima (B e T), temperatura de pirólise (250 °C e 450 °C) e tempo de incubação no solo (M0 e M2).	30
Tabela 7. Caracterização do solo após aplicação do <i>biochar</i> de bagaço-de-cana (B) e torta de filtro (T) pirolisados a 250 e 450 °C com diferentes tempos de incubação, 0 meses (M0) e 2 meses (M2).	31
Tabela 8. Fator de Retardamento (R), <i>Peclet number</i> (P) e coeficiente de dispersão ($\text{cm}^2 \text{min}^{-1}$) (D) obtidos mediante o ajuste das BTC's da cada repetição dos diferentes tratamentos.	37
Tabela 9. Quadro da análise de variância resumida para fator de retardamento (R), número de Peclet (P) e coeficiente de dispersão (D).	42
Tabela 10. Desdobramento do efeito do fator tempo de incubação dentro de temperatura e vice-versa para o fator de retardamento (R).	42
Tabela 11. Quadro de ANOVA resumido para densidade das colunas.	44
Tabela 12. Médias dos parâmetros de transporte do íon potássio aplicado via vinhaça em solos condicionados com biochar de torta de filtro e bagaço de cana-de-açúcar.	45
Tabela 13. Comparação entre as densidades médias das colunas de solo condicionados com <i>biochar</i> de torta de filtro (T) e bagaço de cana-de-açúcar (B), pirolisados a 250 e 450 °C, incubados por 0 (M0) e 2 (M2) meses.	45
Tabela 14. Comparação de médias do número de Peclet (P) sob o efeito da interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise.	46
Tabela 15. Comparação de médias do número de Peclet (P) sob o efeito da interação entre matéria-prima e tempo de incubação.	46
Tabela 16. Comparação de médias do coeficiente de dispersão (D) sob o efeito da interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise.	47
Tabela 17. Comparação de médias do coeficiente de dispersão (D) sob o efeito da interação entre matéria-prima e tempo de incubação.	48

1. INTRODUÇÃO

A busca por sistemas de produção agrícola sustentáveis é alvo constante de debate no atual contexto agrícola mundial, dessa forma, há uma procura permanente por cadeias produtivas com essas características visando promover o uso racional de resíduos, conservação dos solos, proteção de recursos hídricos e redução da emissão de gases de efeito estufas.

Nesse contexto, a cadeia produtiva da cana-de-açúcar ocupa lugar de destaque no setor agrícola brasileiro, uma vez que, atualmente, o país é o maior produtor mundial dessa cultura, com mais de 750 milhões de toneladas produzidas em 2019, conforme o último levantamento realizado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO). Parte desse total produzido é destinada à produção de etanol, a qual foi superior a 34 bilhões de litros, nesse mesmo período (CONAB, 2020). Nessa cadeia da cana-de-açúcar, assim como em outros processos de transformação de matéria-prima, são geradas grandes quantidades de resíduos, dentre eles destacam-se: vinhaça, bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro.

A vinhaça é um subproduto líquido oriundo do processo de produção do etanol (para cada litro de etanol são produzidos 13 litros de vinhaça). Diversos estudos realizados ao longo das últimas décadas apontam seu grande potencial de uso como fertilizante orgânico nas próprias lavouras de cana-de-açúcar, de forma a reduzir a quantidade de aplicação de potássio via fertilizante. Porém, há um outro aspecto a ser considerado que é o impacto ambiental, por meio da contaminação de águas subterrâneas mediante o processo de lixiviação de alguns dos seus componentes químicos. Tal fato demanda alternativas que sejam capazes de aliar o uso da vinhaça, como fonte alternativa de adição de nutrientes, com o menor prejuízo ambiental segundo a legislação vigente.

O bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo fibroso do processo de produção de etanol que possui diversas possibilidades de uso agrícola, dentre elas pode-se destacar a compostagem, alimentação animal e, mais recentemente a produção de *biochar*, um tipo de carvão vegetal que aplicado ao solo possui a capacidade de melhorar suas características físico-químicas, como a capacidade de retenção de água e de nutrientes nas camadas superficiais, aumentando assim a capacidade do solo em disponibilizar esses nutrientes para o sistema radicular das plantas, ao longo do tempo, de maneira mais “lenta”.

Nesse mesmo contexto é possível também, incluir a torta de filtro, outro subproduto da produção sucroalcooleira oriundo da filtração do caldo nos filtros rotativos. Devido a sua composição rica em alguns elementos essenciais esse resíduo tem sido utilizado como fonte de nutrientes nas lavouras de cana-de-açúcar mediante sua aplicação *in natura* ou por compostagem junto com outros materiais, além disso, há a possibilidade da produção de *biochar* a partir dessa matéria prima.

Diante desses aspectos, a hipótese principal da presente pesquisa foi que a aplicação do *biochar*, em conjunto com a aplicação de vinhaça ao solo, altera de maneira positiva os atributos físico-químicos do solo, de modo a alterar positivamente os parâmetros de transporte do potássio (K^+) no solo, quando da aplicação da vinhaça (fertilirrigação), favorecendo assim a redução da lixiviação desse íon, bem como, aumentando sua disponibilidade à planta, sobretudo na zona radicular, devido às características do *biochar* em função da sua matéria prima, pirólise e tempo de incubação. Tal elemento químico foi escolhido pela sua relevância em termos econômicos e em relação a importância no manejo nutricional da cana-de-açúcar, sobretudo em regiões de solos mais intemperizados e arenosos, com capacidade limitada de adsorvê-lo e fornecê-lo às plantas.

Nesse sentido, o principal objetivo dessa pesquisa foi obter os parâmetros de transporte do íon potássio, presente na vinhaça, mediante elaboração e ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's), sob aplicação de vinhaça em solo de textura arenosa (solo representativo da região canavieira de Piracicaba, SP), condicionado com diferentes tipos de *biochar* (bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro), sob diferentes pirólises (250 °C e 450 °C) e diferentes tempos de incubação (0 e 2 meses).

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Avaliar a dinâmica do íon potássio, mediante avaliação de parâmetros de transporte, decorrentes da aplicação de vinhaça em um solo de textura arenosa, condicionado com *biochar* produzido a partir de duas matérias primas distintas: bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro. Além do aspecto do transporte, buscou-se verificar se houve alterações nas propriedades físico-químicas do solo.

1.2. Objetivos específicos

- a) Avaliar se a presença do *biochar* no solo irá promover alguma alteração nas propriedades físico-químicas do solo;
- b) Obtenção dos parâmetros de transporte do íon K^+ , mediante elaboração e ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's) utilizando-se o modelo STANMOD (*ST*udio of *AN*alytical *MO*DEls) e dessa forma identificar comportamentos de deslocamento de potássio (efeitos adsorptivos) aplicado via vinhaça em solos que receberam a aplicação de *biochar*; e
- c) Avaliar a dinâmica dos íons K^+ , sob a presença do *biochar* oriundo de diferentes matérias primas (bagaço de cana e torta de filtro), produzido sob diferentes temperaturas de pirólise (250 °C e 450 °C) e tempos de incubação do *biochar* (0 e 2 meses).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultivo da cana-de-açúcar

Atualmente, o cultivo da cana-de-açúcar está presente em todos os continentes devido ao seu elevado potencial de participação em processos tecnológicos avançados e produtividade, bem como, com grande aptidão para geração de açúcar, etanol e energia. Considerada como sendo um dos principais cultivos do mundo e responsável pela movimentação e desenvolvimento da economia de países tropicais emergentes (Matos et al., 2020). De acordo com o último levantamento da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (2019), Brasil, Índia, China e Tailândia são responsáveis por 70% da produção mundial.

O levantamento da safra 2020/2021 da Companhia Nacional de Abastecimento (2021) estima que a área de cana-de-açúcar colhida no Brasil nesse período foi superior a 8,5 milhões de hectare, com uma produção superior a 650 milhões de toneladas, o que torna o país líder mundial na produção da cultura. Desse montante, 54% foi destinado à produção de etanol, produzindo cerca de 30 bilhões de litros do combustível e o restante utilizado na produção de açúcar, rendendo cerca de 42 milhões de toneladas. A maior parte da produção nacional está concentrada na região sudeste, sendo o estado de São Paulo o maior produtor (CONAB, 2021).

Desde a criação do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), em 1975, o setor produtivo da cana-de-açúcar no Brasil caracterizou-se por transformações nas variadas etapas do processo produtivo, desde a implantação de novas tecnologias no plantio, que aumentam a produtividade (Cortez et al., 2018) e, consequentemente, a rentabilidade da cultura, até as inúmeras pesquisas atuais que objetivam o reaproveitamento dos diversos resíduos gerados pela atividade (Eykelbosh et al., 2015; Speratti et al., 2018; Zelaya et al., 2019), de forma a torná-la mais sustentável.

Embora existam inúmeros benefícios gerados pela atividade sucroalcooleira no país, muitos aspectos relevantes podem ser observados em sua cadeia produtiva, dentre eles, o destaque para o descarte de resíduos com caráter poluidor do meio ambiente, principalmente a vinhaça, bem como a supressão da biodiversidade provocada pela implantação da monocultura da cana-de-açúcar (Alvarenga e Queiroz, 2009).

2.2. Aspectos do processo produtivo da cana-de-açúcar

2.2.1. Transformação da cana-de-açúcar em etanol e açúcar

Embora existam outros métodos de produção de etanol, a fermentação alcoólica pela ação das leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae* é o mais amplamente difundido e utilizado pelas usinas de produção de etanol ao redor do mundo. Nesse processo tais leveduras realizam a conversão dos açúcares presentes no caldo ou mosto da cana-de-açúcar em etanol, energia, biomassa celular e CO₂ (Lopes et al., 2016). Segundo Amorim e Lopes (2009) o processamento dessa cultura é caracterizado no Brasil pela técnica da reciclagem das leveduras, o que proporciona uma alta carga destas nos tanques de fermentação contribuindo para uma curta duração dessa etapa (6 a 10 horas), que por sua vez é seguida da destilação do líquido fermentado para produção de etanol hidratado (96%) e da desidratação deste para gerar o etanol anidro. Ao longo dessas etapas são gerados diversos subprodutos tais como o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça (Prado et al., 2013).

De forma semelhante ao que ocorre na produção de etanol, a cana destinada à produção de açúcar é moída e o seu caldo posteriormente é tratado química e fisicamente, contudo no processo de produção de açúcar além das etapas de aquecimento, calagem, decantação e filtração são realizados procedimentos que objetivam a clarificação do mesmo tais como aplicações de dióxido de enxofre gasoso (Pina et al., 2017). Em seguida o caldo tratado passa pelo processo de concentração dando origem a um xarope com alta concentração de sacarose que é submetido à cristalização em painéis a vácuo e posteriormente centrifugado para que haja a separação entre o melaço e o açúcar, que finalmente tem sua umidade reduzida com auxílio de turbinas de ar a 100 °C originando o produto final. Com exceção da vinhaça todos outros resíduos gerados na produção do etanol também são gerados na fabricação do açúcar (Rein, 2016).

2.2.2. Vinhaça

No processo de produção do etanol, a partir da cana-de-açúcar, após a destilação do mosto, é gerado como subproduto um líquido geralmente ácido, com alto conteúdo de cálcio e potássio, boas quantidades de nitrogênio e fósforo e alta carga orgânica (COD 50-150 g L⁻¹) denominado de vinhaça (Cabello et al., 2009; España-Gamboa et al., 2011).

O alto volume produzido, cerca de 9 a 14 litros para cada litro de etanol processado, por muito tempo foi descartado na natureza de forma indiscriminada e aleatória, o que constituía em um sério risco ao meio ambiente, uma vez que a vinhaça possui elevado poder poluente equivalente a cem vezes o do esgoto doméstico (Espana-Gamboa et al., 2011). Por outro lado, Christofolletti et al. (2013) apontam que sua rica composição química em elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas e matéria orgânica oferecem a possibilidade de uso como fertilizante. De acordo com esses autores, a fertirrigação é a forma mais comum, simples e de baixo custo da utilização da vinhaça com essa finalidade, na qual uma solução contendo vinhaça é aplicada ao solo via sistema de irrigação.

Com o objetivo de regulamentar essa prática, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) possui uma norma técnica atualizada em 2015 que leva em consideração o conteúdo de potássio no solo, a necessidade da cultura em relação a esse nutriente e sua concentração na vinhaça a ser aplicada. De acordo com tal regulamentação o volume de vinhaça a ser aplicada em determinada área é calculado pela equação 1 (CETESB, 2015):

$$VV = \frac{[(0,05 \cdot CTC - ks) \cdot 3744 + 185]}{kvi} \quad (1)$$

Em que VV corresponde ao volume de vinhaça (m³ ha⁻¹), CTC à capacidade de troca catiônica a pH 7 (cmol_c dm⁻³), ks à concentração de potássio no solo (cmol_c dm⁻³), 3744 à constante de transformação dos valores para kg em profundidade equivalente a 0,80 m, kvi à concentração de K₂O na vinhaça (kg m⁻³).

No entanto, segundo Correia (2015), a falta de fiscalização pela CETESB e o enorme volume desse subproduto gerado contribuem para aplicação de doses indiscriminadas às lavouras, podendo gerar impactos ambientais devido a contaminação de corpos hídricos, bem como o desperdício de nutrientes. Além disso, considerar apenas parâmetros relacionados ao potássio na dosagem pode gerar superestimação de outros nutrientes como o nitrogênio, cujo sua forma de nitrato polui as águas subterrâneas ou superficiais.

No Brasil as doses de vinhaça aplicadas nas lavouras de acordo com a regulamentação da CETESB variam de 155 a 234 m³ ha⁻¹ e embora tais valores sejam calculados a partir dos parâmetros da normativa, a quantidade de K⁺

aplicada ao solo pode superar a demanda das lavouras de cana-de-açúcar, o que pode provocar a saturação do solo com esse nutriente e, conseqüentemente, elevar a lixiviação de outros tais como Ca^{2+} e Mg^{2+} (Fuess et al., 2018). Sendo assim, a depender das circunstâncias da aplicação, o uso da vinhaça na fertirrigação pode gerar a falsa sensação de uma destinação adequada à mesma (Santana e Fernandes Machado, 2008). Visto isso, estudos que possibilitem melhor entendimento da dinâmica dos íons presentes nesse resíduo, sob diferentes cenários, fazem-se necessários para evitar desequilíbrios no sistema solo, bem como problemas ambientais e econômicos em decorrência de sua aplicação.

2.2.3. Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é o primeiro resíduo gerado no processamento da cana-de-açúcar. Ao final do processo de moagem para cada tonelada de cana processada são gerados em média de 140 a 280 kg do mesmo (Alcarde, 2009; Melati et al., 2017). A composição desse resíduo é influenciada por diversos fatores tais como o tipo de solo em que a cana foi cultivada, método de colheita, uso de fogo ou outros métodos de remoção de palhada pré-colheita e procedimentos de limpeza da cana (Rabelo et al., 2015).

Segundo Rabelo et al. (2015), o uso do caldo da cana para geração de etanol representa o aproveitamento de aproximadamente apenas um terço da energia contida nas plantas. Ainda de acordo com esses autores o rico conteúdo de celulose, hemicelulose e lignina em sua composição, torna o bagaço uma fonte viável de produção de etanol de segunda geração, incrementando em mais 35% no aproveitamento da energia da cana-de-açúcar. Além dessa finalidade esse resíduo é bastante utilizado no processo de compostagem, alimentação animal e na geração de energia elétrica através da queima em caldeiras (Melati et al., 2017). Estudos recentes também apontam o bagaço como uma boa matéria-prima para produção de *biochar* (Piccolla, 2013; Zelaya et al., 2019).

Utilizando bagaço de cana como matéria-prima para produção de *biochar* aplicado em lavouras de beterraba Alves et al. (2021) notaram melhorias em atributos do solo tais como pH, CTC e fósforo disponível, o que proporcionou incrementos na produtividade da cultura. Em outra perspectiva de aplicação o *biochar* de bagaço de cana mostrou-se eficiente na imobilização de metais pesados tais como chumbo e cromo, reduzindo a absorção destes por plantas de alface e conseqüentemente os riscos à saúde humana (Khan et al., 2020).

De acordo com Azeem et al. (2019) a aplicação de *biochar* de bagaço de cana pirolisado a 350 °C melhorou de forma significativa a qualidade de um solo franco arenoso mediante a redução da densidade do solo de 1,46 g cm⁻³ para 1,36 g cm⁻³, bem como aumentando o conteúdo de água deste em até 60% em relação ao controle. Ainda segundo estes autores, a aplicação desse tipo de *biochar* associada a fertilizantes inorgânicos (NPK) foram responsáveis pelos maiores incrementos no estoque de carbono orgânico do solo nas condições da sua pesquisa.

2.2.4. Torta de filtro

Ao final do processo de decantação o caldo da cana é enviado para a filtração na qual o açúcar residual é removido e fica retido nos filtros o resíduo denominado de torta de filtro. De modo semelhante ao que ocorre com o bagaço a composição da torta pode variar de acordo com o tipo de solo, variedade da cana, método de colheita, dose de hidróxido de cálcio aplicada, tratamento de clarificação, método de filtração, dentre outros (Rabelo et al., 2015).

Devido a sua rica composição em nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio esse resíduo, gerado em proporções aproximadas de 30 kg por tonelada de cana moída, tem sido usado como fonte de nutrientes para as lavouras aplicado de forma *in natura* ou compostado com outros materiais, apresentando-se como boa alternativa para adubação de solos

arenosos com baixos teores de matéria-orgânica (Alcarde, 2009; Rabelo et al., 2015; Rossetto e Santiago, 2009). Por outro lado a transformação da torta de filtro em *biochar* tem apresentado bons resultados na redução da emissão de gases de efeito estufa pelas lavouras de cana (Eykelbosh et al., 2014) bem como no aumento da qualidade do solo relacionado a aspectos físico-químicos e biológicos (Eykelbosh et al., 2015; Speratti et al., 2018).

A aplicação de *biochar* produzido a partir da torta de filtro proporcionou redução significativa na densidade do solo, o que culminou numa maior condutividade hidráulica no trabalho realizado por Eykelbosh et al. (2015). Nesse mesmo estudo, tais autores concluíram que o aumento da porosidade de aeração decorrente da aplicação do *biochar* de torta de filtro foi responsável pela elevação da atividade microbiológica do solo, resultando num processo mais acelerado de mineralização da matéria orgânica do solo e, conseqüentemente, lixiviação mais intensa de nitrato no mesmo mediante a aplicação de vinhaça. Além disso, a aplicação desse tipo de *biochar* em doses de 5 a 10 % (p/p) em solos tropicais com elevado grau de intemperismo foi capaz de aumentar a capacidade de retenção de água destes, bem como doses a partir de 1,25 % (p/p) proporcionaram efeitos significativos no aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes (Eykelbosh et al., 2014).

2.3. Aspectos sobre o *Biochar*

O *biochar* é um carvão vegetal produzido por meio da pirólise que se trata de um processo de queima de uma biomassa em um sistema fechado, a temperaturas controladas bem como sob quantidade limitada de oxigênio. Suas propriedades químicas variam de acordo com a matéria-prima, temperatura, tempo e quantidade de oxigênio utilizados no processo de produção (Lehmann e Joseph, 2009). Inúmeras pesquisas recentes apontam melhorias nas características físico-químicas dos solos tais como pH, capacidade de troca catiônica e capacidade de retenção de água após sua aplicação (Petter et al., 2012; Verheijen et al., 2019; Zelaya et al., 2019).

De acordo com Suliman et al. (2016) a matéria prima e a temperatura de pirólise possuem efeito significativo em propriedades de interesse agrônômico do *biochar* tal como a CTC. Segundo esses autores essa propriedade é resultado da presença de grupos funcionais oxigenados na composição do material. Em seu trabalho, observaram que a depender da matéria prima utilizada à medida em que se aumentou a temperatura de pirólise houve redução nas quantidades de grupos carboxílicos e fenólicos que em alguns casos foi traduzida em leves reduções na CTC do biocarvão produzido.

Speratti et al. (2018) comprovaram que *biochars* oriundos de uma mesma matéria-prima, porém pirolisados a diferentes temperaturas tiveram comportamento distintos em relação à capacidade de reter íons. De maneira geral, temperaturas de pirolises superiores a 550°C produziram biocarvões com elevadas superfícies específicas (Downie et al., 2009), grande quantidade de compostos orgânicos estáveis resistentes à decomposição no solo, e, quantidade de cinzas e pH mais elevados em comparação àqueles gerados em temperaturas inferiores a essa (Singh and Cowie, 2010). Visto isso, torna-se fundamental o estudo mais aprofundado do efeito de materiais primas e temperaturas de pirólise antes da recomendação desse resíduo como ferramenta para aumentar a adsorção de elementos no solo.

Segundo Petter et al. (2012), ao estudarem o efeito da aplicação de *biochar* em solos do cerrado sob o cultivo do arroz, a adição desse componente ao sistema foi capaz de elevar o pH e aumentar os níveis de fósforo, potássio e cálcio disponíveis para as plantas elevando a produção da cultura. De acordo com Zelaya et al. (2019), essa disponibilidade de nutrientes cresce de forma linear com o aumento das doses. Além disso, esse tipo de carvão vegetal foi capaz de aumentar o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) em 160 a 210% em comparação a solo sem aplicação e elevar o valor da CTC do solo de forma significativa (Zeeshan et al., 2020).

Outro ponto positivo do seu uso na agricultura é que sua lenta decomposição proporciona a capacidade de fixar carbono ao solo, atuando como sequestrador de carbono (Lehmann e Joseph, 2009). Tal afirmação é corroborada por Kätterer et al. (2019), que ao estudarem os efeitos do *biochar* ao longo do tempo concluíram que 9 anos após única aplicação cerca de 40% do carbono e nitrogênio orgânicos oriundos do biochar ainda estavam presentes no solo de regiões sub-úmidas do Quênia. Ainda segundo esses autores, para o conteúdo de fósforo extraível pelas plantas, o efeito da aplicação não é persistente a longo prazo, ou seja, apesar de promover melhoria nessa variável, com o passar do tempo há redução das quantidades disponíveis.

Eykelbosh et al. (2014) observaram melhores valores em parâmetros tais como pH, CTC e teores de macronutrientes no solo (N, P, K, Ca, Mg e S) em tratamentos que receberam aplicações de até 5% (peso/peso) de *biochar* produzidos a partir da torta de filtro da indústria sucroalcooleira.

No que diz respeito às melhorias nas características físicas do solo a aplicação de *biochar* é capaz de aumentar a capacidade de retenção de água (Eykelbosh et al., 2014) e a porosidade, além de reduzir a densidade (Kätterer et al., 2019; Zeeshan et al., 2020), o que contribui para elevar a produção das culturas devido ao efeito positivo sobre o crescimento do sistema radicular, otimizando o aproveitamento dos nutrientes do solo.

A capacidade de sorver moléculas de defensivos agrícolas com poder de contaminação é mais uma característica de interesse agrônomo do *biochar*. Petter et al., 2019 observaram que a aplicação de doses crescentes desse composto aumentaram a sorção do herbicida diuron de modo a reduzir potenciais riscos de lixiviação do mesmo e, conseqüentemente, a contaminação de corpos hídricos.

2.4. Íon potássio no solo

A busca por incrementos em produtividade nos sistemas agrícolas atuais tem aumentado a quantidade de fertilizantes a base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) aplicadas ao solo. Tal prática, quando ocorre de forma indiscriminada representa um problema econômico e/ou ambiental, uma vez que os componentes desses produtos podem ser perdidos por lixiviação alcançando os corpos hídricos gerando contaminação das águas e ao não serem absorvidos pelas plantas reduzem a eficiência da adubação podendo ocasionar redução da produtividade das culturas.

O potássio (K^+) mais acessível às plantas está ligado às cargas negativas da fração coloidal do solo por ligações eletrostáticas facilmente reversíveis, o que possibilita sua rápida restituição à solução do solo quando é absorvido pelas culturas ou lixiviado (Ernani et al., 2007). Por possuir boa mobilidade vertical no perfil do solo, sendo essa característica influenciada pela quantidade de água que se movimenta verticalmente no perfil e concentração do nutriente na solução do solo (Ernani et al., 2007), a aplicação de resíduos orgânicos líquidos ricos em K, como é o caso da vinhaça, pode provocar o aumento nas perdas desse nutriente por lixiviação (Christofolletti et al., 2013).

Outro fator que afeta a dinâmica do K^+ no sistema é a textura do solo. De acordo com Rosolem e Steiner (2017), solos mais arenosos perdem potássio mais facilmente em relação a solos argilosos, o que exige aplicação de maiores doses do nutriente para alcançar altas produtividades e manter um balanço positivo de K^+ disponível às plantas. Sendo assim, buscar por condicionadores de solo que ajudem na melhoria da capacidade de retenção de K^+ nas camadas de interesse às plantas é muito importante para evitar perdas desse nutriente por lixiviação.

O uso de resíduos líquidos ricos em potássio pode provocar alterações na estabilidade estrutural do solo bem como na dinâmica da água ao longo do perfil, conseqüentemente ocorrem modificações na movimentação de cátions no solo (Liang et al., 2021). Segundo Liang et al. (2021) a aplicação de água de reuso de vinícolas, que assim como a vinhaça possui elevados teores de K^+ na sua composição, pode promover dispersão dos colóides do solo

modificando a condutividade hidráulica do mesmo de modo a alterar a dinâmica do potássio e outros íons tais como Mg^{2+} e Ca^{2+} .

A presença de outros íons na solução do solo também pode alterar a dinâmica do potássio no perfil. Kolahchi e Jalali(2006) concluíram que o retardamento do deslocamento do K^+ é diminuído na presença do íon Ca^{2+} , de modo que quanto maior a concentração deste na solução aplicada maior a lixiviação do potássio no solo. Corroborando com tal fato Vilela et al.(2018) notaram que a interação do K^+ com o solo foi reduzida quando aplicou-se água de tratamento de esgoto em substituição à solução de KCl com mesma concentração de potássio, segundo os autores este resultado deve-se à presença de diversos outros cátions na água de tratamento de esgoto, que por sua vez competem por sítios de sorção nas cargas do solo com o K^+ .

De acordo com Li et al.(2021) o clima atua como principal fator determinante na quantidade de potássio no solo, uma vez que em condições de altas temperaturas e precipitações tais fatores climáticos favorecem maiores perdas desse íon devido alterações em propriedades do solo, tais como CTC e grau de intemperismo, que possuem papel fundamental na dinâmica do K^+ . Ainda segundo estes autores, condições topográficas, composição mineralógica das argilas do solo e propriedades do solo chaves, são o segundo, terceiro e quarto fatores que mais influenciam nos teores de potássio do solo, respectivamente.

2.5. Dinâmica de solutos no solo

A movimentação de água e solutos no solo é estreitamente relacionada a variáveis físico-químicas. Dessa forma, pelo fato de se lidar com o movimento simultâneo de componentes químicos, considera-se que o transporte dos solutos no solo é uma consequência do fluxo de massa (movimento laminar ou viscoso da solução no solo) e da dispersão hidrodinâmica que resulta da dispersão mecânica da solução no meio poroso (solo) e difusão iônica (movimentação por gradiente de concentração) (Leij e van Genuchten, 1999). O entendimento desses dois componentes do processo de transporte, que ocorrem simultaneamente, é fundamental para o estabelecimento de práticas de manejo para o controle da dinâmica de solutos no solo (Bresler and Dagan, 1981).

2.5.1. Parâmetros de transporte de solutos no solo

De acordo com Leij e van Genuchten (1999), o transporte de solutos no solo é resumido em dois processos básicos: a convecção ou advecção, no qual os solutos dissolvidos são transportados passivamente pelo fluxo de água no solo, sendo a quantidade transportada dependente da concentração destes na solução, bem como do volume e da velocidade da água fluindo através dos poros e; o mecanismo de difusão-dispersão hidrodinâmica, envolvendo a dispersão mecânica e o transporte por difusão de íons em meio poroso, principalmente em regiões do solo nas quais ocorrem variações microscópicas da velocidade da água e/ou ocorre baixa velocidade ou movimento nulo de água no solo.

O entendimento da movimentação de solutos no solo é realizado a partir da elaboração de modelos matemáticos que são capazes de determinar a dinâmica destes ao longo do perfil de solo. Normalmente os parâmetros desses modelos são estimados pelo ajuste dos resultados experimentais, sob uma condição específica de fluxo (Álvarez-Benedí et al., 1999). Sendo assim, o sucesso desses está atrelado à sua capacidade de obtenção de parâmetros, os quais serão dados de entrada em modelos utilizados na simulação da dinâmica de solutos em um perfil de solo.

Os parâmetros de transporte podem ser obtidos mediante o ajuste numérico de curvas de distribuição de efluentes (Breakthrough Curves, BTC's) dos quais podem se destacar a velocidade com que a solução movimenta-se nos poros (v), o coeficiente de dispersão (D) e o fator de retardamento (R) (Silva, 2013).

Dentre os modelos computacionais utilizados para esse fim destaca-se o STANMOD (*STudio of ANalytical MODels* - versão 2.08) (Šimůnek et al., 2011), amplamente utilizado no mundo, e que a partir do ajuste numérico da curva de efluentes obtida experimentalmente, podem ser obtidos os valores correspondentes ao v , D , R e número de Peclet (P).

Para um melhor embasamento teórico sobre esses parâmetros, sabe-se que em uma condição equilíbrio linear variações na concentração de um soluto na solução do solo são acompanhadas de mudanças imediatas na fração adsorvida às cargas coloidais, nesse sentido assumindo que o solo como um meio poroso homogêneo a água movimenta-se por poros interconectados o transporte de solutos pode ser descrito por (Leij and van Genuchten, 1999):

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

em que C é a concentração do soluto ($M L^{-3}$), t corresponde ao tempo (T), x é a distância (L), v é a velocidade média da água no poro ($L T^{-1}$), D é o coeficiente de dispersão ($L^2 T^{-1}$) e R o fator de retardamento (adimensional)

O coeficiente de dispersão (eq. 3) representa o efeito da dispersão mecânica e difusão molecular no transporte de um soluto no solo. Geralmente é assumido como sendo uma função da velocidade da água no poro (eq. 3):

$$D = \lambda \cdot v^n \quad (3)$$

Em que, λ é a dispersividade do meio poroso (L); v é a velocidade da água no poro ($L T^{-1}$) obtida pela razão entre a densidade de fluxo (q) e umidade (θ) (eq. 4); n é uma constante empírica próxima a 1.

$$v = \frac{q}{\theta} \quad (4)$$

O fator de retardamento (R) (eq. 5) é a capacidade de retenção ou efeito tampão do solo para um elemento ou composto presente em um resíduo (Campos and Elbachá, 1991). Além disso, é um parâmetro que expressa, indiretamente, a capacidade do solo em reter determinado soluto, isto é, quanto maior o fator de retardamento maior é a interação do solo com o soluto e maior é a capacidade do solo em retê-lo pois a fase sólida do solo interage com os íons em solução retardando seu transporte em relação a água (Wierenga and Genuchten, 1989).

$$R = 1 + \frac{\rho \cdot K_d}{\theta} \quad (5)$$

Em que R é o fator de retardamento (adimensional); ρ é a densidade do solo ($M L^{-3}$); K_d é o coeficiente empírico de distribuição (igual a zero quando não há interação entre o soluto e o solo (adimensional)); θ é o conteúdo volumétrico de água ($L^3 L^{-3}$).

O número de Peclet é um parâmetro adimensional utilizado no estudo da difusão através de um meio poroso, utilizado para determinar qual mecanismo (convecção ou dispersão-difusão) domina o processo de transporte

de solutos (Gonçalves, 2007; Roth, 1996), evidenciando a relação entre a velocidade de transporte por convecção e a velocidade de transporte por difusão molecular. Pequenos valores do número de Peclet indicam que o transporte de difusão domina sobre o transporte de convecção. Para maiores valores do número de Peclet, o transporte de convecção sobrepõe-se em relação à difusão (Gonçalves, 2007; Wang, 2002). Esse parâmetro é obtido pela seguinte equação.

$$P = \frac{v \cdot L}{D} \quad (6)$$

Em que, v é a velocidade da água nos poros ($L T^{-1}$); L é o comprimento da coluna de solo (L); D é o coeficiente de dispersão ($L^2 T^{-1}$).

2.5.2. Ajuste numérico de *Breakthrough Curves* (BTC's)

O STANMOD é um *software* cujo a finalidade é avaliar o transporte de solutos no solo mediante a resoluções analíticas da equação de Advecção-dispersão (eq. 2). Dentro do *software* estão disponíveis sete códigos que possibilitam a caracterização do movimento de solutos de diferentes naturezas tais como nutrientes e substâncias químicas poluentes, sob diferentes condições. Embora seja amplamente difundido no mundo, com utilização em inúmeros estudos envolvendo dinâmica de solutos no solo (Broznić et al., 2021; Kotlar et al., 2020; Nir et al., 2012), o uso do programa é limitado a perfis de solo homogêneos bem como a fluxos unidirecionais de fluidos (van Genuchten et al., 2012), ou seja, não é possível considerar o efeito das raízes e a presença de camadas com características distintas no movimento de solutos.

A obtenção dos parâmetros de transporte é realizada pelo STANMOD a partir do ajuste numérico de dados experimentais obtidos mediante a elaboração das *Breakthrough curves* (BTC's), para tal é possível utilizar dentro do programa o código CFITIM, que considera a coluna de solo como um meio semi-infinito em que o fluxo de fluido ocorre em apenas uma direção, ou seja, não considera regiões em que a solução possa permanecer imóvel (poros fechado), bem como que a relação entre a fase líquida e sólida do solo é de equilíbrio, isto é, mudanças nas concentrações de um soluto na solução são seguidas de alterações imediatas no teor desse na fase sólida e vice versa.

O CFITIM resolve analiticamente a EAD modificada para parâmetros adimensionais

$$R \frac{\partial C}{\partial T} = \frac{1}{P} \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - \frac{\partial C}{\partial X} \quad (7)$$

em que T corresponde a vL/L , referido como volume de poros e X é dado por x/L , mediante a equação 8 (Lapidus e Amund, 1952 apud. van Genuchten et al., 2012).

$$c(X, T) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{P}(RX - T)}{2\sqrt{RT}} \right] + \frac{1}{2} e^{PX} \operatorname{erfc} \left[\frac{\sqrt{P}(RX - T)}{2\sqrt{RT}} \right] \quad (8)$$

em que *erfc* é a função do erro complementar.

Além disso, o presente código permite a estimativa dos parâmetros em condições de não equilíbrio físico-químico, em que se considera a existências de regiões no meio poroso em que a solução flui lentamente ou permanece estacionada, bem como que as mudanças nas concentrações de um soluto na fase líquida não são seguidas de mudanças imediatas na fase adsorvida aos coloides do solo (Leij and van Genuchten, 1999).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento

O experimento foi conduzido em condições de laboratório junto ao Departamento de Engenharia de Biosistemas (LEB), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizada no município de Piracicaba – SP (22° 43’ 33” S, 47° 38’ 00” O, 511 m de altitude).

Buscou-se com a execução do ensaio obter os parâmetros de transporte do potássio mediante a elaboração de *Breakthrough Curves* (BTC's), sob aplicação de vinhaça, em colunas de solo homogeneizadas e condicionadas com *biochar* produzidos a partir das seguintes características: diferentes matérias primas (bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro), diferentes pirólises (250 °C e 450 °C) e diferentes tempos de incubação do *biochar* (0 e 2 meses).

3.2. Obtenção e caracterização das amostras de solo

As amostras de solo foram obtidas em um perfil representativo da produção canavieira da região de Piracicaba na qual foi coletada a camada de 0 a 0,2 m de solo com textura arenosa, classificado com Latossolo Vermelho-Amarelo de acordo com o Sistema brasileiro de classificação de solo (EMBRAPA, 2018).

Após coletadas as amostras foram secas em temperatura ambiente, destorroadas e passadas em peneira de malha 0,002 m para a obtenção de TFSA (terra fina seca ao ar). Em seguida foram enviadas ao laboratório para determinação de características físico-químicas que influenciam no transporte de solutos no solo (**Tabela 1**). A análise granulométrica foi realizada pelo método proposto pela EMBRAPA (2017) e as demais análises químicas conduzidas de acordo com IAC (2001).

Tabela 1. Caracterização físico-química inicial do solo

Propriedade	Unidade	
	Física	
Areia	76,0	%
Silte	4,1	%
Argila	19,9	%
	Química	
pH CaCl ₂	5,67	-
M.O.	15,1	g dm ⁻³
Fósforo	21,8	mg dm ⁻³
Enxofre	24,5	mg dm ⁻³
Cálcio	23	mmol _c dm ⁻³
Magnésio	9,8	mmol _c dm ⁻³
Potássio	2,39	mmol _c dm ⁻³
Alumínio	< 0,1	mmol _c dm ⁻³
H+Al	17,6	mmol _c dm ⁻³
SB	35,2	mmol _c dm ⁻³
CTC	52,8	mmol _c dm ⁻³
V	67	%
M	0	%
Boro	0,41	mg dm ⁻³
Cobre	1	mg dm ⁻³
Ferro	21	mg dm ⁻³
Manganês	31,2	mg dm ⁻³
Zinco	2,4	mg dm ⁻³

3.3. Obtenção, caracterização e aplicação do biochar ao solo

O *biochar* foi preparado e produzido comercialmente pela empresa SP Pesquisa e Tecnologia Ltda. a partir das seguintes matérias primas: bagaço da cana-de-açúcar e torta de filtro. Em seu preparo foi realizada a pirólise sob as seguintes temperaturas: 250 °C e 450°C. Após essa etapa de produção, o material foi passado através de peneira de malha com 0,002 m de diâmetro e enviado ao laboratório para caracterização físico-química com o objetivo de determinar suas propriedades e relacioná-las com as prováveis alterações na dinâmica de íons no solo (**Tabela 2**).

Tabela 2. Caracterização físico-química inicial do biochar de torta de filtro (indicados com a letra “T”) e bagaço de cana-de-açúcar (indicados com a letra “B”) produzidos em diferentes temperaturas de pirólise.

Variável	Tipo de <i>Biochar</i>				Unidade
	T		B		
	250 °C	450 °C	250 °C	450 °C	
pH (CaCl ₂ 0,01 mol L ⁻¹)	5,5	6,5	4,4	4,5	-
Densidade	0,48	0,59	0,12	0,19	g cm ⁻³
Umidade Total	4,1	0,23	1,03	0,33	%
Matéria Orgânica Total	18,69	11,78	53,82	28,6	%
Carbono Orgânico	9,26	5,39	28,62	14,66	%
Resíduo Mineral Total (R.M.T.)	77,21	87,99	45,16	71,07	%
Resíduo Mineral Insolúvel (R.M.I.)	65,33	72,99	37,91	60,89	%
Nitrogênio Total	9.500	5.000	3.300	2.100	mg kg ⁻¹
Fosforo (P ₂ O ₅) Total	6.000	8.400	2.500	3.200	mg kg ⁻¹
Potássio (K ₂ O) Total	2.800	3.600	4.000	8.000	mg kg ⁻¹
Cálcio (Ca) Total	5.600	9.700	3.600	4.600	mg kg ⁻¹
Magnésio (Mg) Total	4.100	5.700	3.100	3.800	mg kg ⁻¹
Enxofre (S) Total	900	400	2.100	1.500	mg kg ⁻¹
Relação C/N	10	11	87	70	-
Cobre (Cu) Total	27	35	25	35	mg kg ⁻¹
Manganês (Mn) Total	642	1.175	440	593	mg kg ⁻¹
Zinco (Zn) Total	94	122	65	77	mg kg ⁻¹
Ferro (Fe) Total	22.818	26.850	15.401	23.938	mg kg ⁻¹
Boro (B) Total	2	2	3	3	mg kg ⁻¹
Sódio (Na) Total	314	349	422	424	mg kg ⁻¹
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	270	120	160	140	mmolc kg ⁻¹
Capacidade de Retenção de Água (CRA)	76,22	118,14	172,29	314,75	%

Os diferentes tipos de *biochar* (T_250, T_450 e B_250, B_450) (250 e 450 indicam os valores de temperatura) foram homogeneizados em dose equivalente a 50 ton ha⁻¹ com as amostras de TFSA simulando uma aplicação (incorporação) ao solo como tradicionalmente é feita em condições de campo (Petter et al., 2012). O objetivo da dose utilizada foi “forçar” um possível efeito do material no transporte de K⁺ ao solo.

Na sequência de atividades, foi coletada uma amostra de cada um dos conjuntos (solo + *biochar*) e acondicionou-se em vaso, saturada por capilaridade (Figura 1a) e mantida próxima a capacidade de campo durante 2 meses (Figura 1b) de modo a permitir que as partículas do biocarvão interagissem com o solo promovendo alterações em suas propriedades (Incubação).



Figura 1. Processo de saturação das diferentes combinações de solo com biochar (a) e incubação dos conjuntos (b).

O controle da umidade do material de solo + *biochar* foi realizado mediante leituras da tensão de água no solo com o auxílio de tensímetro. Após a saturação mediu-se diariamente a tensão até que atingisse o valor de -10 kPa (ponto de referência da capacidade de campo para solos arenosos), nesse momento foi estimada a massa do conjunto para obtenção do valor da umidade do solo, com base em massa, no ponto de capacidade de campo (CC).

Posteriormente realizou-se o mesmo procedimento a cada 7 dias para determinar a quantidade de água perdida no período, bem como, quanto seria necessário repor para retornar à condição inicial. Ao final de 2 meses, os solos condicionados com o *biochar* foram secos em temperatura ambiente, passados em uma peneira com malha de 0,002 m e assim, esse material de solo, foi utilizado para o preenchimento das colunas visando o ensaio das BTC's. Por outro lado, amostras de cada conjunto foram utilizadas para preencher tais colunas imediatamente após a homogeneização, ou seja, sem tempo de incubação com o solo. O objetivo dessa etapa foi verificar se o tempo de interação solo + *biochar* foi fator determinante nas alterações de propriedades do solo e consequentemente nos parâmetros de transporte do potássio.

Uma amostra de cada combinação dos fatores foi encaminhada ao laboratório para avaliação de atributos químicos a título de compará-los com aqueles obtidos na análise de solos não condicionados com o biocarvão.

A composição química dos biocarvões produzidos é bastante variável tanto entre as temperaturas de pirólise como entre as diferentes matérias primas (MP's). Devido ao elevado conteúdo de macronutrientes todos os *biochars* desse estudo podem ser considerados fontes de elementos essenciais. Nesse contexto, o B_450 apresentou elevado teor de potássio em comparação aos demais (**Figura 2a**), assim como o T_450 destacou-se em relação ao teor de cálcio (**Figura 2a**). Foi possível observar também que para um mesmo material de origem, as menores temperaturas originaram biocarvões com maior conteúdo de matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC), tal fato está ligado à correlação negativa existente entre temperatura de pirólise e presença de grupos funcionais responsáveis pela geração de cargas negativas na estrutura do *biochar* (Zhang et al., 2020).

Em termos de comparação das matérias-primas entre si pode-se afirmar que o *biochar* de torta de filtro apresentou os menores tores de MO, maiores valores de CTC em média (**Figura 2b**), bem como menor relação C:N (**Figura 2c**), possivelmente devido à composição química dos materiais de origem, uma vez que o bagaço é um resíduo

mais fibroso e lignificado, com maior quantidade de C e menos minerais na sua composição (Conz, 2015; Rabelo et al., 2015). Speratti et al. (2018) obtiveram resultados similares comparando *biochar* de torta de filtro com outros materiais mais lignificados tais como casca de eucalipto e restos culturais de algodão.

No âmbito das características físicas nota-se que o *biochar* de bagaço de cana-de-açúcar apresentou menor densidade (**Tabela 2**) e maior capacidade de retenção de água (CRA), em que os maiores valores dentro de cada matéria-prima foram obtidos na pirólise a 450 °C (**Figura 2d**).

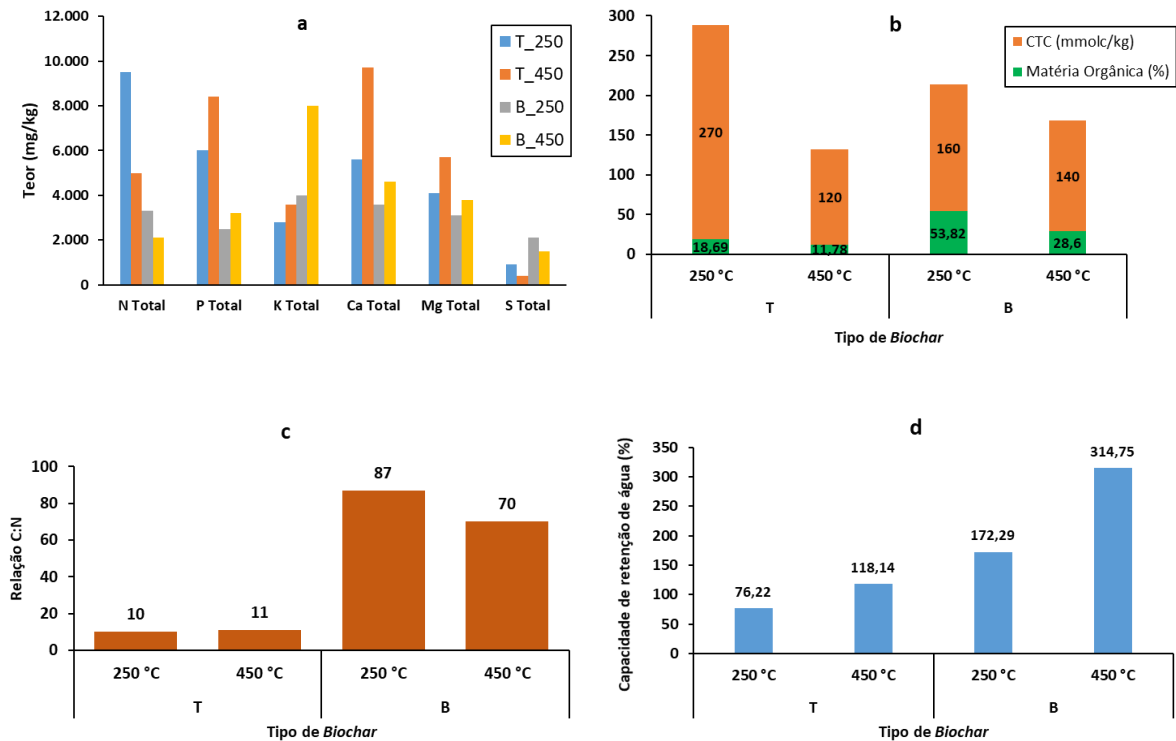


Figura 2. Teor de nutrientes (a), Matéria orgânica (b), Capacidade de troca catiônica (b), relação C:N (d) e Capacidade de retenção de água (d) dos *biochars* produzidos a partir da torta de filtro (T) e bagaço de cana-de-açúcar (B) em diferentes temperaturas de pirólise (250 °C e 450°C).

3.4. Obtenção e aplicação de vinhaça aos tratamentos

A vinhaça utilizada foi obtida junto à uma usina de produção de etanol, na região canavieira de Piracicaba, SP, e enviada ao laboratório comercial da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP para determinação de características físico-químicas (**Tabela 3**).

De posse dessas informações foi possível conhecer a concentração inicial de potássio que seria aplicada no ensaio das curvas de efluentes bem como a composição iônica desse resíduo orgânico.

Tabela 3. Caracterização físico-química inicial da vinhaça.

Parâmetro	Unidades
pH	4,8
Densidade	0,99 g mL ⁻¹
Matéria Orgânica	16,45 g L ⁻¹
Carbono Total	9,14 g L ⁻¹
Nitrogênio Total	380 mg L ⁻¹
Fósforo (P ₂ O ₅)	80 mg L ⁻¹
Potássio (K ₂ O)	4250 mg L ⁻¹
Cálcio (Ca)	900 mg L ⁻¹
Magnésio (Mg)	240 mg L ⁻¹
Enxofre (SO ₄)	970 mg L ⁻¹
Cobre (Cu)	0 mg L ⁻¹
Zinco (Zn)	2 mg L ⁻¹
Manganês (Mn)	4 mg L ⁻¹
Ferro (Fe)	8 mg L ⁻¹
Sódio (Na)	47,50 mg L ⁻¹

3.5. Obtenção dos parâmetros de transporte do íon potássio

3.5.1. Montagem das *Breakthrough curves*

Com o objetivo de se obter os parâmetros de transporte do íon K⁺ no solo foram elaboradas *Breakthrough Curves* (BTC's). Nesse procedimento as amostras de solo homogeneizadas com diferentes tipos e tempos de incubação do *biochar* foram acondicionadas, em camadas constantes de volume conhecido, em colunas de solo com 0,2 m de altura e 0,05 m de diâmetro interno, resultando nas densidades médias apresentadas na **Tabela 4**.

Tabela 4. Densidade média (Q_s) das colunas preenchidas de cada tratamento.

Tratamento	Densidade do conjunto na coluna	Unid.
Controle	1,36	g cm ⁻³
B_250_M0	1,19	g cm ⁻³
B_450_M0	1,24	g cm ⁻³
T_250_M0	1,28	g cm ⁻³
T_450_M0	1,30	g cm ⁻³
B_250_M2	1,14	g cm ⁻³
B_450_M2	1,19	g cm ⁻³
T_250_M2	1,27	g cm ⁻³
T_450_M2	1,26	g cm ⁻³

No início do ensaio, as colunas contendo os tratamentos foram saturadas lentamente, por capilaridade, objetivando expulsar todo ar presente nos microporos. Para isso, essas foram inseridas em baldes que em seguida foram preenchidos com água destilada adicionada por gotejamento junto a parede até 2/3 da altura das colunas. Após essa etapa o conjunto permaneceu em repouso por 24 horas para que ocorresse a saturação. Em seguida, foi realizada a “lavagem” da coluna, na qual, por mais 24 horas, foi aplicada água destilada através da mesma para que todos os íons presentes em solução fossem removidos por percolação. Ao final desse período, verificou-se em cada unidade experimental se a densidade de fluxo da água estava em condição de regime permanente, caso comprovada tal condição foi interrompida a aplicação de água e imediatamente deu-se início à aplicação da vinhaça pela metodologia de fluxo

contínuo, que consiste em aplicar uma concentração conhecida do soluto e verificar a concentração das amostras de efluentes em um determinado espaço de tempo de percolação (**Figura 3**). As colunas utilizadas tinham fundo com tela que permitia o fluxo da solução.

Ao longo da aplicação de vinhaça foi realizada a coleta das soluções efluentes, seguida da determinação das concentrações de potássio em cada volume sequencial coletado (15 mL). Além disso realizar-se-á o cálculo do volume de poros em função do volume da coluna e da porosidade do solo de acordo com a equação 7.

$$VP = \alpha \cdot V \quad (7)$$

em que **VP** corresponde ao volume de poros (L^3), α é a porosidade do solo na coluna ($L^3 L^{-3}$) e V é o volume de solo na coluna (L^3). Ressalta-se que cada volume efluente coletado representa uma fração do **VP** da coluna.

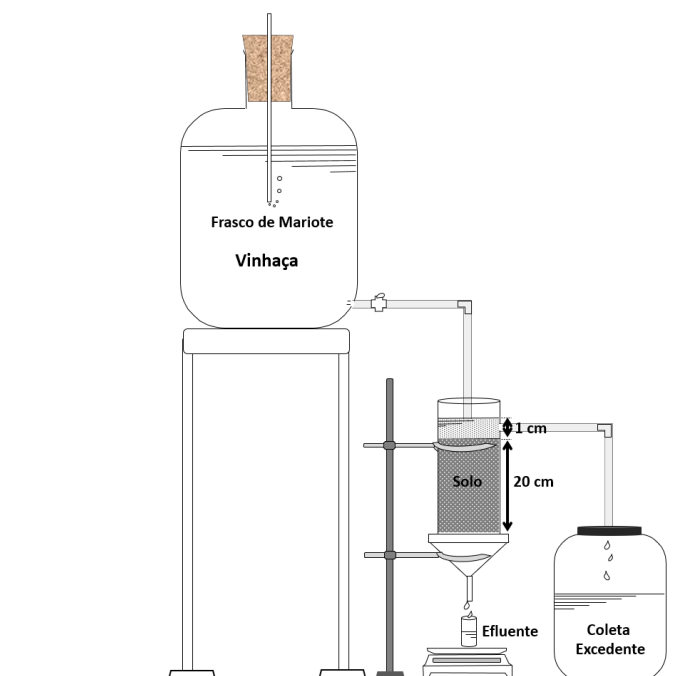


Figura 3. Esquema para elaboração de Breakthrough Curves visando obtenção de parâmetros de transporte de nutrientes aplicados via vinhaça.

3.5.2. Ajuste numérico das *Breakthrough curves* pelo modelo STANMOD

Para cada uma das unidades experimentais, foram elaboradas as BTC's e coletando-se os dados referentes às concentrações de K^+ na solução efluente, respectivamente a cada volume de poros, para cada coluna. Para a obtenção dos parâmetros de transporte, foi feito o ajuste numérico pelo modelo STANMOD (**ST**udio of **AN**alytical **MOD**els) (versão 4.17) (Šimůnek et al., 2013), lançando mão do problema inverso e do código CFITIM, que utiliza como dados de entrada a concentração relativa (C/C_0) do soluto e o volume da solução efluentes acumulada dividido pelo volume de poros da coluna (**VP**).

Num primeiro momento foi selecionado o referido código (**Figura 4**), em seguida optou-se pela condição de contorno que considera a coluna como um meio poroso semi-infinito em condições de equilíbrio físico-químico (**Figura 5**), ou seja, tal condição assume que todos os poros da coluna estejam interconectados sem a presença de poros nos quais a água permaneça imóvel (poros fechados), bem como que mudanças na concentração do soluto na solução são seguidas de alteração imediata na fração deste adsorvida aos coloides, nessa etapa também são informados o número de pontos coletados no ensaio. Posteriormente foi inserido o chute inicial dos parâmetros a serem ajustados (**Figura 6**) e por fim as frações do **VP** coletadas e suas respectivas concentrações relativas (**Figura 7**).

Pelas Figuras de 4 a 7 podem ser conferidas as telas do passo a passo com os respectivos dados de entrada no modelo STANMOD para que fossem realizadas o ajuste numérico dos parâmetros de transporte do íon potássio.

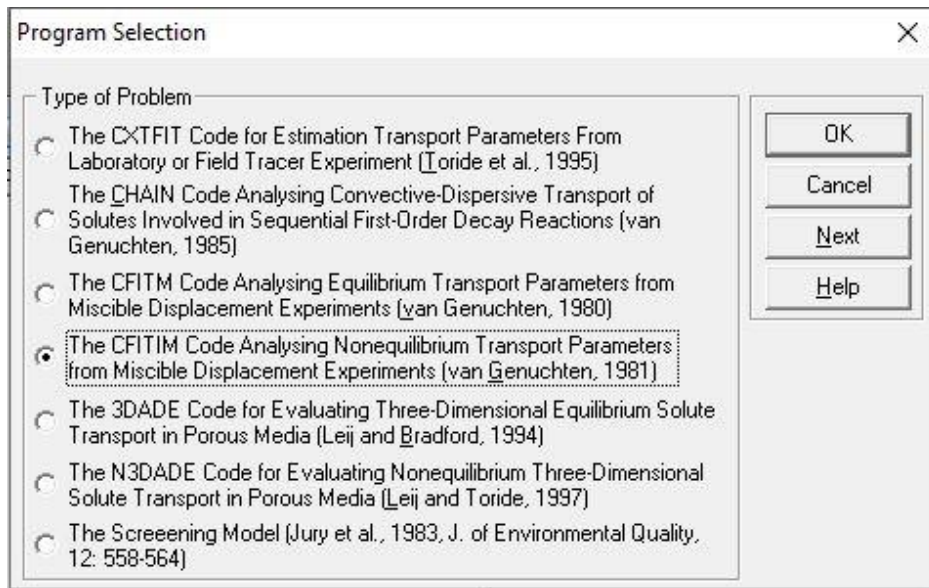


Figura 4. Seleção do código na interface do STANMOD.

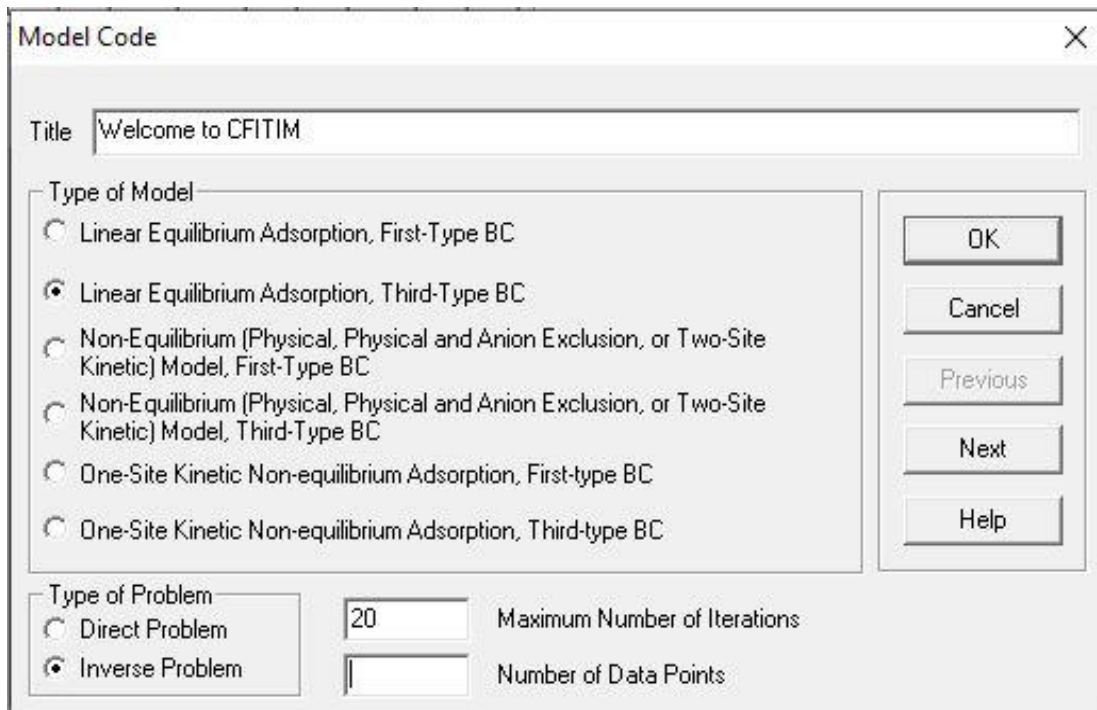


Figura 5. Seleção das condições de contorno (*number of data points* varia de acordo com o número de dados coletados durante a elaboração de cada BTC).

	Peclet	RetFac	Pulse
Parameter Name	Peclet	RetFac	Pulse
Initial Estimate	1	1	10
Fitted ?	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Help

Figura 6. Chute inicial dos parâmetros a serem obtidos.

Pela Figura 7 pode-se conferir a entrada de dados no modelo STANMOD, do volume de poros e concentração relativa, cujos dados foram dados obtidos experimentalmente, para que fosse realizado o ajuste numérico para obtenção dos parâmetros de transporte do potássio em cada tratamento. Tais parâmetros foram: fator de retardamento (R) e número de Peclet (P).

	Pore Volume	Concentration
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		

Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Add Line, Delete Line, Help ...

Figura 7. Inserção de dados referentes ao volume de poros e respectivas concentrações relativas obtidos experimentalmente

A partir da obtenção do valor de P (Peclet Number), foram obtidos os valores dos coeficientes de dispersão (D) e dispersividade (λ). A velocidade média da água nos poros foi determinada pelo tempo de coleta das amostras e o volume de efluente coletado. A obtenção desses valores é de extrema importância para a aplicação em modelos de simulação do movimento de solutos no solo, principalmente em condições específicas dessa pesquisa, com solo condicionado com *biochar*.

No ajuste numérico das BTC's pelo modelo STANMOD, os parâmetros de transporte do K^+ foram obtidos mediante a redução da soma dos quadrados dos erros entre os valores observados (obtidos no ensaio) e simulados para C/C_0 da solução nas colunas com os respectivos tratamentos. Assim, buscou-se analisar os valores obtidos dos parâmetros de transporte, bem como interpretar seus resultados, em termos da inclinação das BTC's ("slope"), de forma que permitisse um enriquecimento da discussão dos resultados obtidos, no sentido de avaliar o efeito adsorptivo do solo e do *biochar* sobre os íons potássio.

3.6. Delineamento experimental

O delineamento experimental foi inteiramente ao acaso em esquema fatorial $2 \times 2 \times 2$, no qual os fatores são matéria prima (bagaço de cana-de-açúcar e torta de filtro), temperatura de pirólise do *biochar* (250 e 450°C) e tempo de incubação no solo (0 e 2 meses), respectivamente (Tabela 5). A combinação dos fatores gera um total de oito tratamentos que foram repetidos três vezes, totalizando 24 unidades experimentais (BTC's), como referência foi conduzido em triplicata o ensaio com colunas sem adição de *biochar* (tratamento adicional), resultando em 27 unidades experimentais (BTC's) (Tabela 6).

Tabela 5. Fatores e níveis de tratamentos e suas respectivas siglas.

Fator	Níveis	Sigla
Matéria-prima	Bagaço de cana-de-açúcar	B
	Torta de filtro	T
Temperatura de Pirólise	250°C	250
	450°C	450
Tempo de incubação	0 meses de incubação	M0
	2 meses de incubação	M2

Tabela 6. Esquema experimental em DIC das combinações dos fatores Matéria-prima (B e T), temperatura de pirólise (250 °C e 450 °C) e tempo de incubação no solo (M0 e M2).

T_450_M2	T_250_M0	B_450_M0	T_450_M0	T_450_M2	B_450_M0
T_250_M2	B_250_M2	B_250_M2	CONTROLE	B_450_M2	T_250_M0
B_250_M0	B_450_M0	T_250_M2	CONTROLE	T_450_M0	B_250_M0
T_250_M0	B_250_M2	B_250_M0	CONTROLE	T_450_M0	B_450_M2
T_450_M2	T_250_M2	B_450_M2			

3.7. Análise dos resultados

Os dados dos parâmetros obtidos foram submetidos à análise de variância pelo *software* RStudio (RStudio Team, 2020) a nível de 5% de significância. Quando identificadas significâncias entre as interações dos fatores pelo teste F as médias das combinações desses foram comparadas entre si por meio do teste de Tukey também a 5% de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir desse ponto, de modo a embasar as discussões relativas ao efeito dos diferentes tipos de *biochar* nos parâmetros de transporte do íon potássio, aplicado ao solo via vinhaça, serão discutidos inicialmente os efeitos do *biochar* (nas diferentes matérias primas e pirólises) nas propriedades físico-químicas do solo, em relação ao tratamento controle, visando permitir a discussão dos parâmetros de transporte, com base nesses resultados.

Posteriormente, cada parâmetro será abordado e discutido de maneira isolada, bem como, suas implicações práticas a partir dos respectivos resultados obtidos.

4.1. Efeitos do *biochar* nas propriedades físico-químicas do solo

De uma maneira geral, houve alterações nas propriedades físico-químicas do solo e observou-se que seu comportamento ficou dependente do tipo de *biochar* aplicado, bem como, de seu tempo de incubação no solo (**Tabela 7**). Essa tendência foi observada em diversas outras pesquisas recentes que avaliaram o efeito da aplicação de *biochars* produzidos a partir de matérias primas distintas sob variadas temperaturas de pirólise (Giagnoni et al., 2019; Kätterer et al., 2019; Petter et al., 2012).

Tabela 7. Caracterização do solo após aplicação do *biochar* de bagaço-de-cana (B) e torta de filtro (T) pirolisados a 250 e 450 °C com diferentes tempos de incubação, 0 meses (M0) e 2 meses (M2).

Valores destacados em verde e laranja, são, respectivamente, os maiores e menores valores de cada parâmetro.

Parâmetros	TRATAMENTOS								Unid.
	B_250_M0	B_450_M0	T_250_M0	T_450_M0	B_250_M2	B_450_M2	T_250_M2	T_450_M2	
pH CaCl ₂	5,22	5,57	5,69	5,73	5,69	5,92	5,9	6,15	-
M.O.	19,9	14,2	18,7	16,9	18,1	13	17,2	15,7	g dm ⁻³
Fósforo	24,6	26,3	66,9	89,6	21,4	24,4	38,1	47,7	mg dm ⁻³
Enxofre	57,1	56	45,9	45,6	47,5	59	60,5	46,4	mg dm ⁻³
Cálcio	23,9	24,8	28,6	27,8	23,6	25,6	29,4	30,7	mmol _c dm ⁻³
Magnésio	8,2	8,1	11	10,1	9,8	9,9	12,8	12,3	mmol _c dm ⁻³
Potássio	2,7	2,93	2,59	2,18	3,07	3,15	2,68	2,23	mmol _c dm ⁻³
Alumínio	0	0	0	0	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	mmol _c dm ⁻³
H+Al	16,7	16,4	17,6	16,4	16,4	14,9	16,7	14,1	mmol _c dm ⁻³
SB	34,8	35,8	42,2	40,1	36,5	38,7	44,9	45,2	mmol _c dm ⁻³
CTC	51,5	52,2	59,8	56,5	52,9	53,6	61,6	59,3	mmol _c dm ⁻³
V	68	69	71	71	69	72	73	76	%
m	0	0	0	0	0	0	0	0	%
Boro	0,55	0,56	0,68	0,6	0,6	0,66	0,63	0,6	mg dm ⁻³
Cobre	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,9	1	1	mg dm ⁻³
Ferro	23	22,8	26,8	30,9	47,9	43,9	60,4	49,9	mg dm ⁻³
Manganês	33,1	31,2	46,7	44,8	18	16,8	20,9	17,8	mg dm ⁻³
Zinco	2,3	2,2	3,1	2,7	1,8	2,0	2,5	2,2	mg dm ⁻³

No que diz respeito a incrementos nos teores de macronutrientes, destaca-se o aumento superior a 300% no fósforo disponível (P) obtido mediante a aplicação do T_450 sem período de incubação (**Figura 8**), correspondendo a 89,6 mg dm⁻³ no presente tratamento.

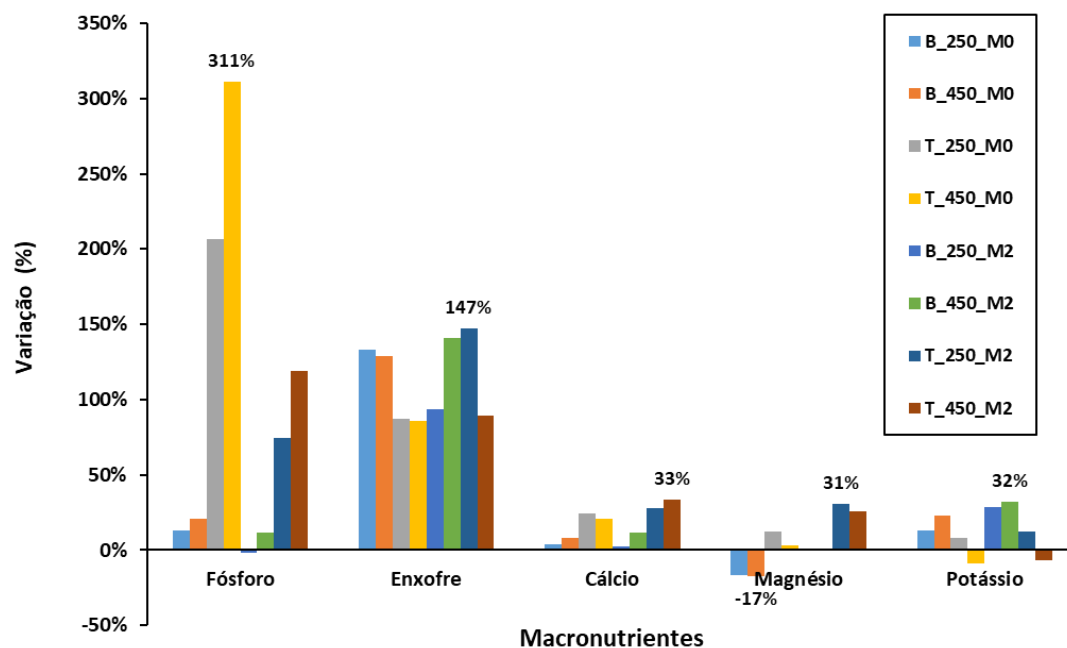


Figura 8. Variações percentuais positivas e negativas nos teores de macronutrientes em relação ao controle para solos condicionados com *biochar* de bagaço de cana (B) e torta de filtro (T), pirolisados a 250 e 450 °C, com diferentes tempos de incubação ao solo, 0 (M0) e 2 meses (M2).

Com exceção do B_250_M2 ($P = 21,4 \text{ mg dm}^{-3}$) todos os demais tratamentos apresentaram elevação nos teores de P no solo, contudo os maiores ganhos em relação ao tratamento controle estão associados ao uso de *biochar* produzidos a partir da torta de filtro, muito provavelmente devido à sua rica composição nesse elemento (**Tabela 2**, apresentada anteriormente). Kätterer et al. (2019) notaram efeito semelhante em solos argilosos tratados com *biochar* de madeira de *Acacia sp.* na região sub-úmida do Quênia, assim como Petter et al., (2012) e Eykelbosh et al., (2014) observaram em solos tropicais arenosos aplicando *biochar* de madeira de eucalipto e torta de filtro, respectivamente.

Notou-se que após dois meses de incubação os níveis de P disponíveis nos tratamentos condicionados com T_250 e T_450 decresceram em relação à mistura (solo + *biochar*) em M0. Tal fato pode estar relacionado com a mineralogia do solo estudado (Latosso Vermelho Amarelo), uma vez que segundo Grecco (2019) esse tipo de solo possui alto conteúdo de óxidos de ferro, responsáveis pela fixação de P. Dessa forma, com o passar do tempo, o fósforo disponível fornecido pelos respectivos *biochars* pode ter sido fixado, sendo convertido em formas não disponíveis assim como ocorreu no trabalho de Giagnoni et al. (2019).

De forma semelhante ao fósforo todos os tratamentos apresentaram aumento nos teores de enxofre no solo (113% em média), conforme **Figura 8**. Embora o teor desse elemento nos *biochars* utilizados não seja tão elevado quanto os outros tais como N e P (**Tabela 2**), é possível que a aplicação de tal resíduo tenha estimulado a mineralização de S no solo de modo a favorecer o aumento da sua disponibilidade (Purakayastha et al., 2019). Blum et al. (2013) comparando *biochar* de talo de milho com outros resíduos observou que o seu uso proporcionou os maiores níveis de mineralização de enxofre dos 15 aos 90 dias de incubação no solo.

Em relação aos cátions, houve um aumento no teor de cálcio em todos os solos condicionados (**Figura 8**), sendo os maiores valores relacionados à aplicação de *biochar* de torta de filtro ($\text{Ca} = 30,7 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$), que possui níveis tão altos desse elemento quanto os encontrados para fósforo (**Tabela 2**). Por outro lado, embora os teores de magnésio e potássio também sejam elevados em todos os biocarvões produzidos, houve redução no conteúdo de Mg no solo

quando aplicou-se B_250 e B_450 sem período de incubação (M0) ($Mg = 8,2$ e $8,1 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, respectivamente), da mesma forma que os solos condicionados com T_450 em M0 e M2 apresentaram depleção nos teores de K ($2,68$ e $2,23 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, respectivamente).

Pela Figura 9, podem ser conferidos os valores das variações percentuais, relativos ao conteúdo de micronutrientes, atributos químicos e matéria orgânica do solo, bem como, unitárias de pH, em relação ao tratamento controle para solos condicionados com biochar de bagaço de cana e torta de filtro, pirolisados a 250 e 450 °C, com diferentes tempos de incubação ao solo, 0 e 2 meses.

Assim como no estudo realizado por Eykelbosh et al., (2014) a aplicação do *biochar* de torta de filtro promoveu aumentos relevantes na disponibilidade de ferro no solo em relação ao controle, sobretudo após dois meses de incubação, em que aumento médio considerando o biochar de bagaço chega a 141 % (**Figura 9a**). No presente trabalho tal aumento pode estar relacionado com os altíssimos valores de Fe detectado em todos os *biochars* (**Tabela 2**), os quais são muito maiores do que os encontrados por Yao et al. (2012) ao pirolisarem bagaço de cana a 300, 400 e 600 °C, o que indica uma possível contaminação ao longo do processo de produção do materiais justificando tal discrepância nas concentrações desse micronutriente.

Por outro lado, embora tenha ocorrido aumento de até 50% no manganês disponível em M0 mediante aplicação de T_250, o que se observou após 2 meses de incubação foi uma redução média de 40 % nos teores desse micronutriente em todos os tratamentos. A disponibilidade do Mn é bastante influenciada pelo aumento do pH, complexação por substâncias húmicas (MOS) e competição por sítios de sorção no solo com o Fe (Brady e Weil, 2009), dessa forma as elevações de pH, MOS e Fe disponível observadas em M2 para todos os tratamentos justificam a depleção nos níveis de Mn em relação ao controle (**Figura 9a**).

Reduções no conteúdo de K após aplicação de *biochar* também foram observadas por Kätterer et al. (2019), que consideraram tal fato como surpreendente uma vez que em dois dos três locais de estudo avaliados por eles a tendência foi oposta. Contudo, os casos supracitados são exceções dentro da presente pesquisa, uma vez que a aplicação dos demais *biochars*, em geral, promoveu acréscimos de até 31 e 32% nos níveis de Mg e K do solo, respectivamente. Como consequência de aumento geral na quantidade de cátions, com exceção do B_250_M0, todos os tratamentos apresentaram aumento nos valores da soma de bases (**Figura 9b**).

Pela **Figura 9c** é possível notar que devido ao seu caráter mais ácido os *biochars* de bagaço de cana num primeiro momento (M0) contribuíram para a redução do pH do solo, porém após dois meses de incubação (M2) proporcionaram aumentos de 0,02 (B_250) e 0,25 (B_450) unidades nesse indicador. Por outro lado, os materiais originados a partir da torta de filtro, cujo pH é mais parecido com o do solo (**Tabela 1** e **Tabela 2**), contribuíram para a elevação em 0,23 (T_250) e 0,48 (T_450) unidades em M2.

Tais resultados estão de acordo com os encontrados por Giagnoni et al. (2019) e Zelaya et al. (2019), que em seus respectivos trabalhos concluíram que a aplicação de *biochar* ao solo tem determinado grau de efeito de calagem, neutralizando íons H^+ presentes na solução do solo. Nesse mesmo contexto notou-se redução da acidez potencial (H+Al) na maioria dos solos condicionados com o biochar em relação ao controle (**Figura 9b**).

O aumento na CTC decorrente da aplicação de *biochar* ao solo é relatado na maioria dos trabalhos da literatura, o que torna esse resíduo uma importante ferramenta no aumento da capacidade do solo em adsorver nutrientes (Beusch et al., 2019; Ghorbani et al., 2019; Lei et al., 2018; Widowati et al., 2014) de modo a mantê-los disponíveis às plantas por mais tempo.

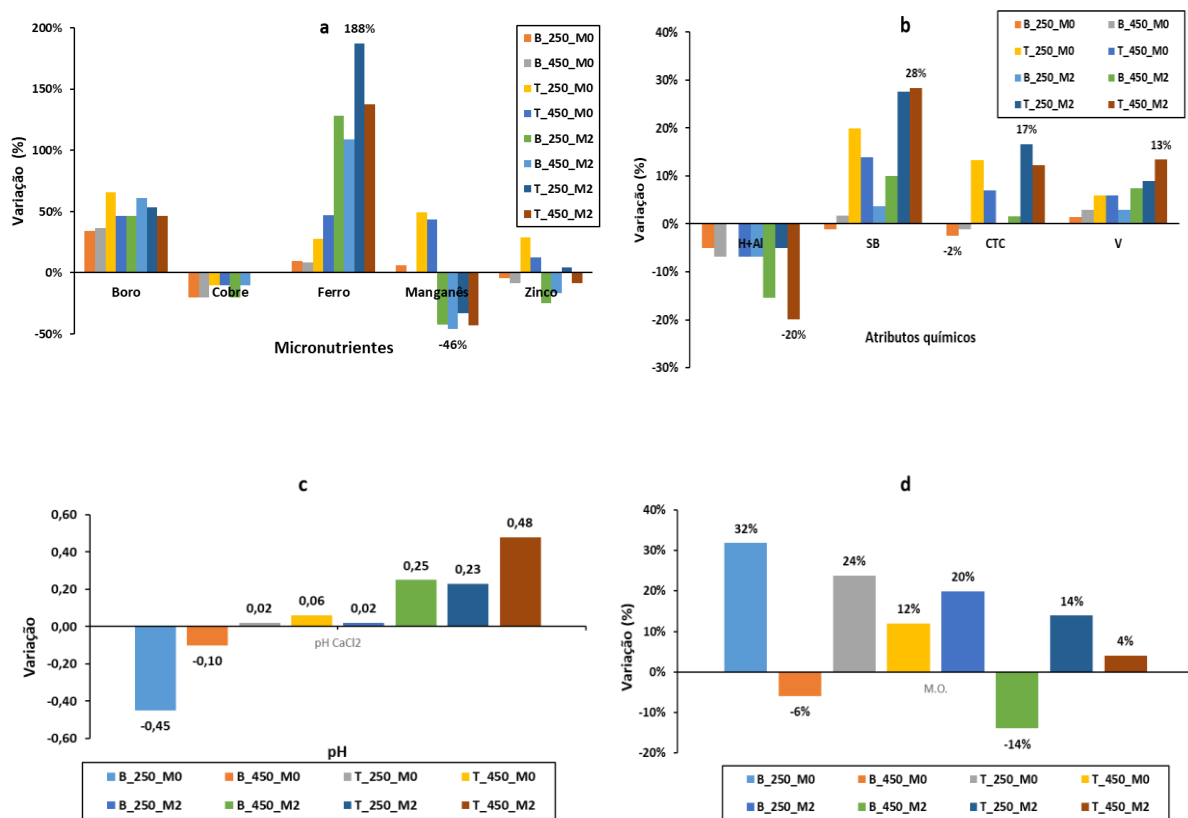


Figura 9. Variações percentuais (conteúdo de micronutrientes (a), atributos químicos (b) e matéria orgânica do solo (d) e unitárias (pH (c)) em relação ao controle para solos condicionados com *biochar* de bagaço de cana (B) e torta de filtro (T), pirolisados a 250 e 450 °C, com diferentes tempos de incubação ao solo, 0 (M0) e 2 meses (M2).

Na presente pesquisa, o *biochar* oriundo do bagaço de cana contrariaram essa tendência com reduções de 1 e 2 % da CTC em B_250_M0 e B_450_M0, respectivamente, ou aumento nulo e de 2% em B_250_M2 e B_450_M2, respectivamente. Yao et al. (2012) concluíram que biocarvões dessa mesma matéria prima produzidos a 300 e 600 °C apresentaram pouca ou nenhuma capacidade de reter o íon amônio (NH_4^+) em experimentos de isotermas de adsorção, indicando o baixo potencial desse material em promover melhorias na CTC e justificando os resultados obtidos aqui.

Por outro lado, assim como ocorreu no trabalho de Eykelbosh et al. (2014) utilizando *biochar* de torta de filtro, observou-se aumento de 7 a 17% na CTC dos solos tratado com esse resíduo em relação ao controle no presente estudo. Além disso, foi possível notar que dentro desses tratamentos as menores temperaturas de pirólise e maiores tempos de incubação promoveram os maiores incrementos (**Figura 9b**). Essa informação corrobora com os resultados das pesquisas de Suliman et al. (2016) e Speratti et al.(2018) que concluíram que para uma mesma matéria-prima, temperaturas de pirólise mais baixas dão origem a *biochars* com maior quantidade de grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, etc.) e, conseqüentemente, maior capacidade de adsorção de cátions, visto isso justificam-se os incrementos observados na CTC. Adicionalmente pode-se atribuir parte desse aumento à elevação do pH decorrente da aplicação do biocarvão, uma vez que em tais condições aumenta-se a presença de cargas negativas nas bordas dos coloides.

O efeito da aplicação dos diferentes tipos de *biochar* na matéria orgânica do solo de forma geral foram positivos (**Figura 9d**), isso porque o alto conteúdo de carbono orgânico desses resíduos em comparação ao solo, bem como o arranjo deste em estruturas aromáticas garante certa resistência aos processos de decomposição microbiana que ocorrem no solo (Eykelbosh et al., 2014; Zhang et al., 2020). O maior conteúdo de carbono dos materiais pirolisados a 250 °C (**Tabela 2**) pode ser considerado como explicação para o maior aumento na MOS em solos condicionados com estes em relação aos demais. Observa-se também que com exceção do B_450 os incrementos mais

significativos ocorreram em tratamentos com o *biochar* de bagaço independente do tempo de incubação. A alta relação C:N (>70) desse material o torna mais resistente à mineralização que o *biochar* de torta de filtro (relação C:N <20) (**Tabela 2**), proporcionando maior acúmulo e tempo de residência no solo.

Quando se comparam os tempos de incubação, notou-se que após 2 meses o teor da MOS foi reduzido em relação a M0 em todos os tratamentos, a interação com o solo expõe os materiais à ação de microrganismos responsáveis pela decomposição e mineralização de compostos orgânicos, por esse motivo é comum que ocorra essa redução mesmo tratando-se de materiais com boa recalcitrância.

De maneira contrária ao que aconteceu nos demais tratamento, a aplicação de B_450 promoveu redução nos teores da MOS em ambos os tempos de incubação. Em alguns casos, a adição de resíduos orgânicos no solo pode estimular a atividade microbiana de maneira a promover a decomposição e mineralização da MOS nativa (efeito *priming*), promovendo reduções nos seus teores (Eykelbosh et al., 2014; Kätterer et al., 2019). Na presente pesquisa acredita-se que por alguma razão tal processo possa ter ocorrido com o uso do B_450, no entanto estudos mais aprofundados são necessários para o esclarecimento desse fato.

4.2. Parâmetros de transporte e *Breakthrough curves* (BTC's) do íon potássio

A determinação dos parâmetros de transporte do potássio bem como a interpretação das suas curvas de efluente obtidas experimentalmente e ajustadas mediante utilização do modelo STANMOD no presente estudo, possibilitaram a abordagem de alguns pontos relacionados à dinâmica desse íon em tais condições. Sendo assim, nessa seção serão discutidos e interpretados o comportamento gráfico das BTC's e os parâmetros obtidos a partir do ajuste numérico destas. Além disso serão abordadas as implicações práticas de tais parâmetros no deslocamento do K⁺ no solo.

4.2.1. Fator de Retardamento (R)

A partir da Figura 10 à Figura 14, podem ser conferidas as BTC's geradas pelo modelo STANMOD. Observa-se no eixo das ordenadas os valores da concentração relativa (C/C₀) que corresponde à razão entre a concentração do potássio na solução efluente coletada mediante aplicação de vinhaça e a concentração inicial do íon nessa mesma solução de vinhaça. Por outro lado, no eixo das abscissas podem ser conferidos os valores de volume de poros (VP) necessário para atingir determinada concentração relativa, dessa maneira uma forma de interpretar tais curvas é mediante a análise desse valor, isto é, quanto maior o VP para atingir C/C₀= 1, maior indício de interação mais intensa do potássio com a fase sólida do solo.

De uma maneira geral, as referidas curvas permitiram inferir a respeito do nível de interação entre solo e soluto. De acordo com Nielsen and Biggar(1962), quando o volume de poros correspondente a C/C₀ = 0,5 for superior a 1 pode-se concluir que há interação entre o soluto e o solo. Ainda segundo esses autores tal valor é uma aproximação do fator de retardamento do elemento nas condições do experimento.

Nesse sentido, a partir da análise das **Figura 10** a 14 é possível notar que na presente pesquisa, o potássio aplicado via vinhaça apresentou interação com o solo em todos os tratamentos. Na Figura 10 os valores do VP que correspondem a C/C₀ = 0,5 foram 1,24, 1,20 e 1,06 em a, b e c, respectivamente. Corroborando com a teoria

estabelecida pelos autores supracitados os valores de R obtido no ajuste das três curvas são 1,28, 1,25, 1,04, respectivamente (Tabela 8).

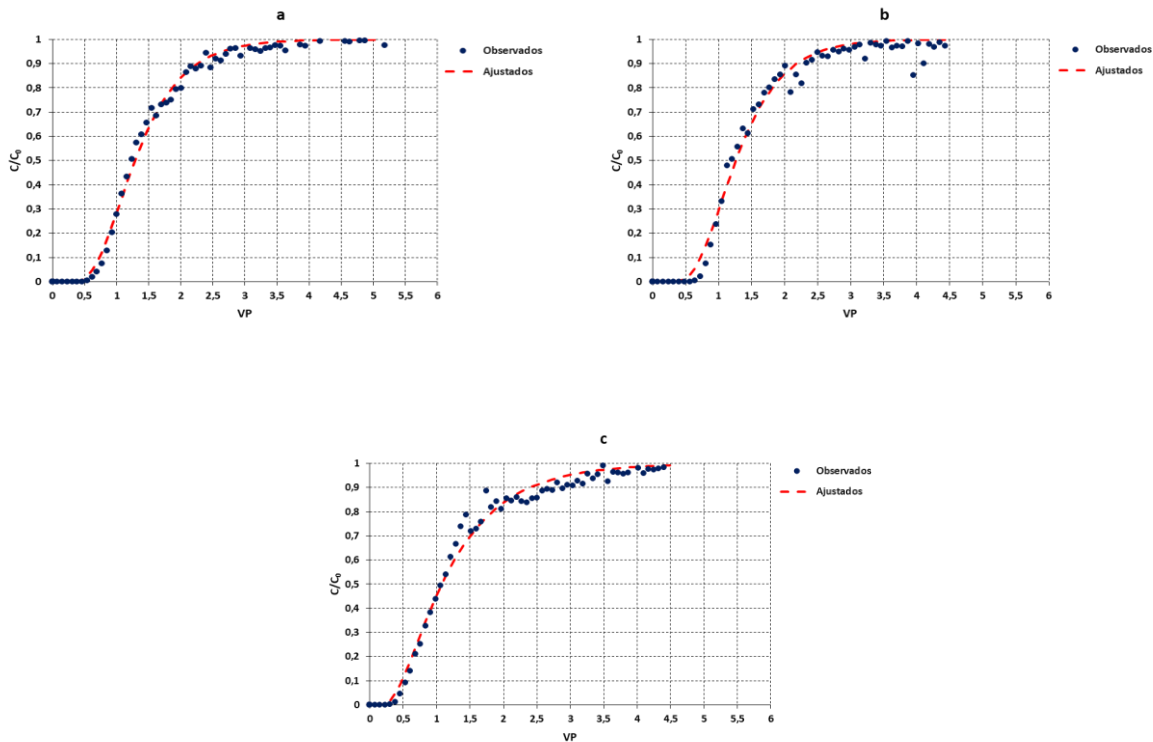


Figura 10. *Breakthrough curves* do íon potássio no tratamento controle (sem *biochar*) em triplicata.

A interpretação das BTC's também foi feita de acordo com seu comportamento gráfico, isto é, quanto maior o deslocamento (*slope*) para a direita “maior” será a interação do solo com o soluto, ou seja, maior a capacidade do solo em “reter” o íon K^+ e, conseqüentemente, mais lenta a sua lixiviação.

Porém, o que se esperava com a presente pesquisa é que as curvas encontradas para solos condicionados com *biochar* fossem mais deslocadas para a direita que aquelas referentes ao tratamento controle (sem *biochar*), de modo a comprovar a hipótese que o biocarvão aumenta a capacidade do solo em reter o potássio aplicado via vinhaça.

Contudo, mais adiante, mediante a plotagem das curvas das repetições de cada tratamento que apresentaram os melhores ajustes (R^2) foi possível perceber que o comportamento do K^+ foi muito semelhante entre as curvas. Observaram-se apenas algumas pequenas variações nos deslocamentos das BTC's em relação ao tratamento controle tanto em M0 como em M2. Também foi possível notar que o VP equivalente a $C/C_0 = 0,5$ foi bastante similar em todas as curvas, indicando valores de R bastante próximos entre os tratamentos.

Tal comportamento gráfico corrobora com o resultado da ANOVA realizada para o fator de Retardamento (Tabela 9), a qual não identificou diferença significativa entre as combinações dos fatores de tratamento e o controle.

Embora num primeiro momento tal análise tenha identificado efeito significativo da interação entre os fatores temperatura de pirólise e tempo de incubação para esse parâmetro, o aprofundamento desta com o desdobramento do efeito de um fator dentro do outro mostrou que tal interação não é significativa ($p \geq 0,05$) (

Tabela 10).

Em termos práticos, o fato dos valores de R serem considerados estatisticamente sem diferença significativa, indicou que a interação do potássio aplicado via vinhaça com o solo foi semelhante tanto nos tratamentos condicionados com *biochar* como no solo não condicionado, ou seja, tais resíduos não aumentaram o efeito adsorvido do solo em relação ao K⁺ aplicado via vinhaça nas condições do experimento.

Tabela 8. Fator de Retardamento (R), *Peclet number* (P) e coeficiente de dispersão (cm² min⁻¹) (D) obtidos mediante o ajuste das BTC's da cada repetição dos diferentes tratamentos.

Tratamento	Repetição	R	P	D
Controle	a	1,28	9,18	3,04
	b	1,25	9,78	1,41
	c	1,04	4,07	6,58
B_250_M0	a	1,16	4,46	6,36
	b	1,10	7,16	3,46
	c	1,07	4,39	4,70
B_450_M0	a	1,21	6,52	3,27
	b	1,17	8,41	1,45
	c	1,23	20,25	0,69
T_250_M0	a	1,16	19,49	0,47
	b	0,98	5,57	2,41
	c	1,29	22,37	0,53
T_450_M0	a	1,16	11,35	1,50
	b	1,23	20,19	0,51
	c	1,26	36,76	0,22
B_250_M2	a	1,23	10,53	1,43
	b	1,09	15,61	1,29
	c	1,15	10,41	2,56
B_450_M2	a	1,07	8,55	2,29
	b	1,15	18,33	0,75
	c	1,19	13,79	0,76
T_250_M2	a	1,27	30,31	0,36
	b	1,27	16,69	0,62
	c	1,20	19,71	0,59
T_450_M2	a	1,15	4,96	7,80
	b	1,11	6,05	4,71
	c	1,08	7,05	2,63

* Valores destacados em verde e vermelho indicam os maiores e menores valores dos parâmetros dentro de cada tratamento, respectivamente.

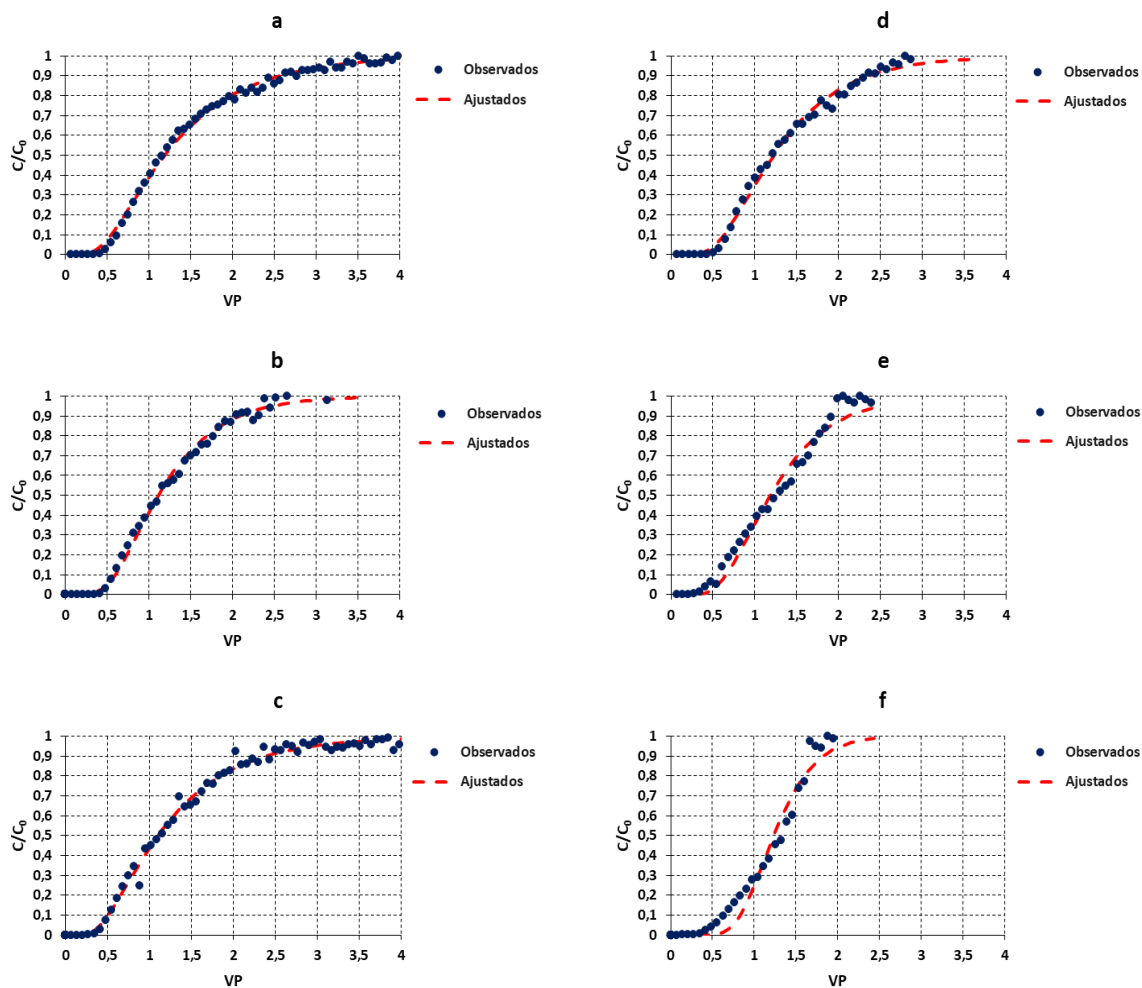


Figura 11. Breakthrough curves do íon potássio nos tratamentos B_250_M0 (a, b, c) e B_450_M0 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.

O principal mecanismo de adsorção de nutrientes pelo solo é sua capacidade de troca catiônica (Brady e Weil, 2009), dessa forma o aumento discreto de no máximo 17 % na CTC em solos condicionados com T_250_M2 ou até mesmo a redução de 2% em B_250_M0 (**Figura 9b**) explicam a ausência de efeito significativo no fator de retardamento nas condições do estudo, indicando que as alterações nesse atributo químico mediante a aplicação dos diferentes *biochars* não foram suficientes para aumentar a interação do potássio com a fase sólida do solo.

Tais resultados estão de acordo com o que concluíram Beusch et al.(2019), ao avaliarem o efeito da aplicação de *biochar* produzido a 450 °C a partir de madeira de Algaroba (*Prosopis juliflora*) esses autores não encontraram efeito significativo na redução da lixiviação de K^+ em solo arenoso condicionado com esse material, ou seja, não houve incrementos na capacidade de adsorção desse elemento em relação à parcelas não tratadas.

As médias do fator de retardamento do potássio variaram de 1,11 a 1,25. Tais valores são menores do que os encontrados por Matos et al. (2013) ($R = 2,17$) ao realizarem experimento de deslocamento miscível de cátions da vinhaça em latossolo com características muito semelhantes ao do presente estudo. A vinhaça aplicada por esses autores possuía 2484 mg L^{-1} de K na sua composição enquanto que a utilizada no presente ensaio apresentou 4250 mgL^{-1} desse elemento, tal fato explica a diferença nesse parâmetro mesmo em condições de solo similares, uma vez que a medida em que se aumenta a concentração de determinado soluto na solução a tendência é que haja um deslocamento da BTC para esquerda (Nielsen and Biggar, 1962) e, conseqüentemente, menor valor de R.

Pela **Figura 15** pode-se perceber uma tendência que o volume de poros necessário para atingir $C/C_0 = 1$ nas colunas preenchidas com a mistura solo mais biochar incubada por 2 meses (2 a 2,5 VP) foi menor em relação ao controle (3,5 VP), cujo a curva encontra-se levemente deslocada para direita. Tal comportamento das BTC's pode estar relacionado com o aumento na disponibilidade de K^+ promovido pela aplicação dos *biochars* ao solo, isso porque tais materiais atuam como fornecedores desse nutriente juntamente com a vinhaça reduzindo o VP (ou tempo) necessário para alcançar 100% da concentração relativa do soluto na solução efluente.

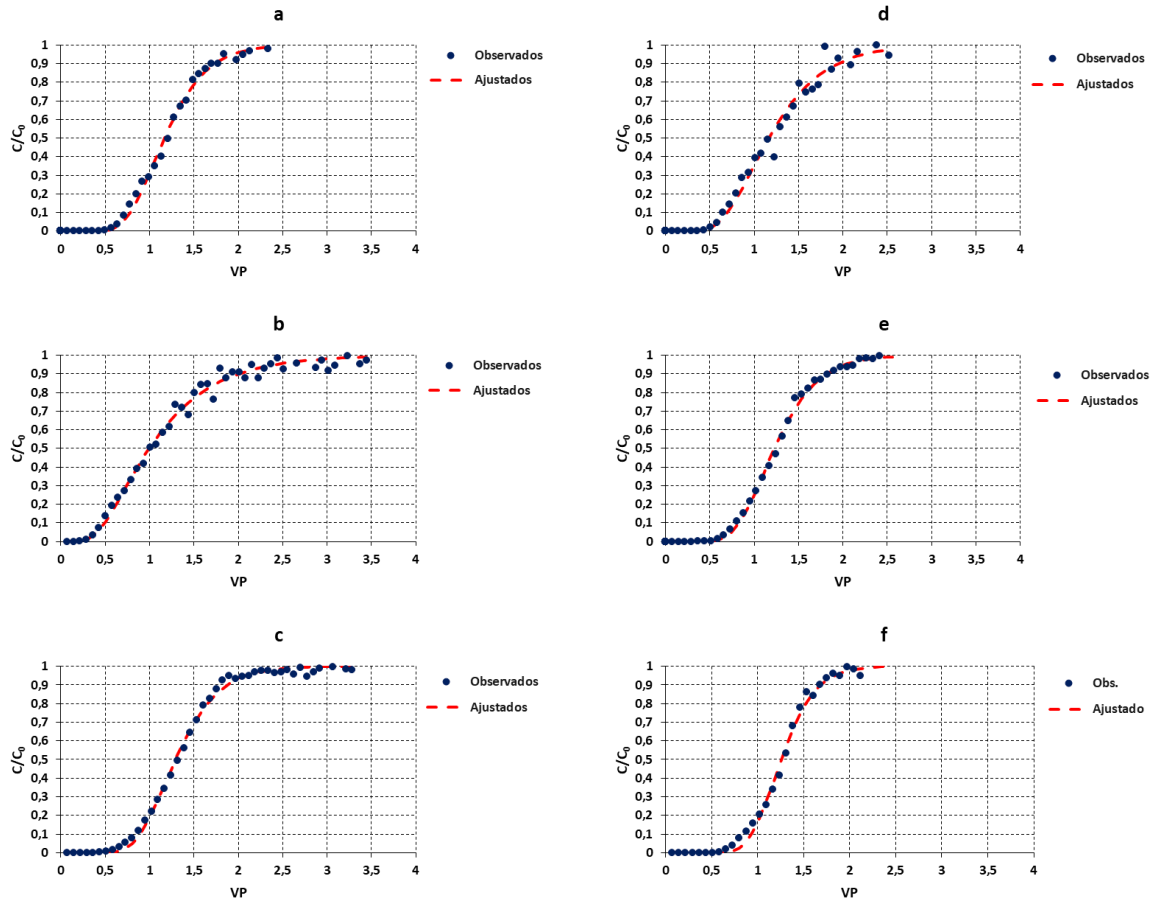


Figura 12. Breakthrough curves do íon potássio nos tratamentos T_250_M0 (a, b, c) e T_450_M0 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.

Em termos práticos, pela maior quantidade de potássio sendo aplicada é possível que haja aumento da lixiviação desse elemento em solos condicionados com os biocarvões de bagaço de cana e torta de filtro assim como ocorreu no trabalho de Widowati et al.(2014), que ao aplicarem *biochar* de fibra de coco em doses equivalentes a $45 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$ notaram aumento de 400% na lixiviação de potássio nas parcelas condicionadas em relação ao controle avaliando solos tropicais intemperizados. Corroborando com a informação supracitada nota-se que o VP equivalente a $C/C_0 = 1$ mais próximo ao do controle é justamente do único tratamento em que não houve aumento na disponibilidade de K em M2: T_450 (**Figura 8**).

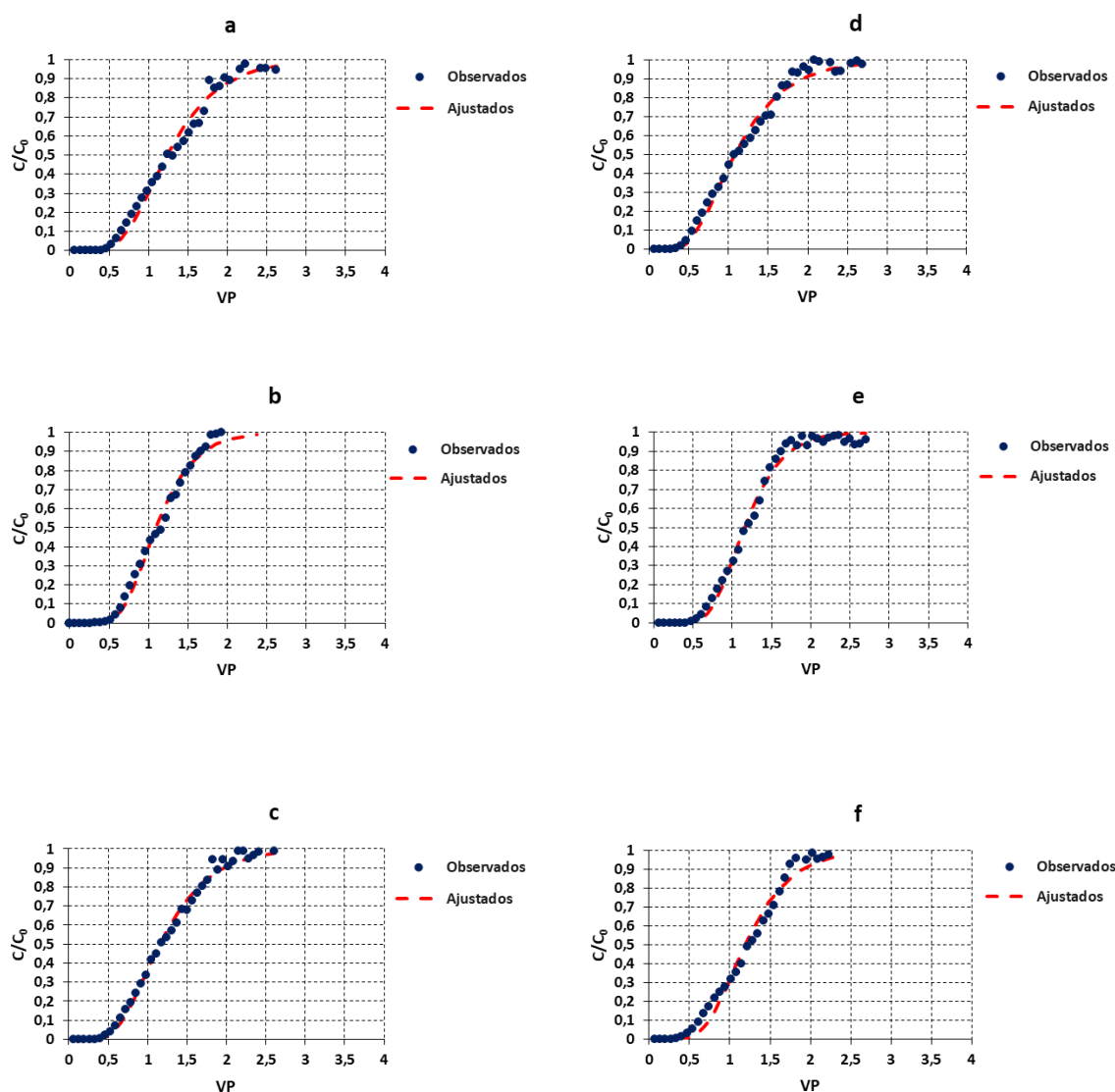


Figura 13. Breakthrough curves do íon potássio nos tratamentos B_250_M2 (a, b, c) e B_450_M2 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.

Em contraste aos VPs encontrados na presente pesquisa, Vilela et al. (2018) obtiveram valores médios de 18 e 35 VP para atingir 100 % da concentração relativa aplicando tratamento de efluentes urbanos e solução de KCl com 30 mgL^{-1} de K em latossolo vermelho, respectivamente. A discrepância entre tais valores e os obtidos com a aplicação de vinhaça deve-se à concentração de K 140 vezes maior em relação às soluções utilizadas por esses autores, bem como à composição química destas. A presença de outros cátions tanto na vinhaça como no tratamento de efluentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , etc.) aumenta a competição por sítios de sorção no solo de modo a reduzir a intensidade de interação do K^+ com os mesmos, demandando um menor VP para que seja alcançado $C/C_0 = 1$, sendo assim é possível inferir que a concentração de um soluto em determinada solução bem como a composição química desta são fatores que determinam o nível de interação solo-soluto expresso em termos de R. Em concordância com esses resultados Andrade et al. (2018) obtiveram menor interação do solo com K em relação ao Na aplicados em concentrações de 75 e 475 mgL^{-1} , respectivamente.

De maneira geral, embora a aplicação dos *biochars* tenham promovido alterações positivas em propriedades químicas do solo relacionadas ao aumento na capacidade desse em reter cátions tais como pH, MOS e CTC, essas não

foram suficientemente intensas ao ponto de alterar a interação adsorptiva entre o potássio e o solo. Possivelmente numa condição em que o tempo de incubação seja maior ou maiores doses de biocarvão sejam aplicadas, mudanças mais acentuadas nas propriedades do solo podem ocorrer promovendo efeitos significativos no valor de R em relação ao controle.

Além disso, acredita-se que a alta concentração de cátions na composição química da vinhaça também contribuiu para uma menor capacidade do solo em adsorver o K^+ , uma vez que Basso e Kiang (2017) notaram redução no valor de R a medida em que aumentou-se a concentração de potássio na solução aplicada (Figura 14).

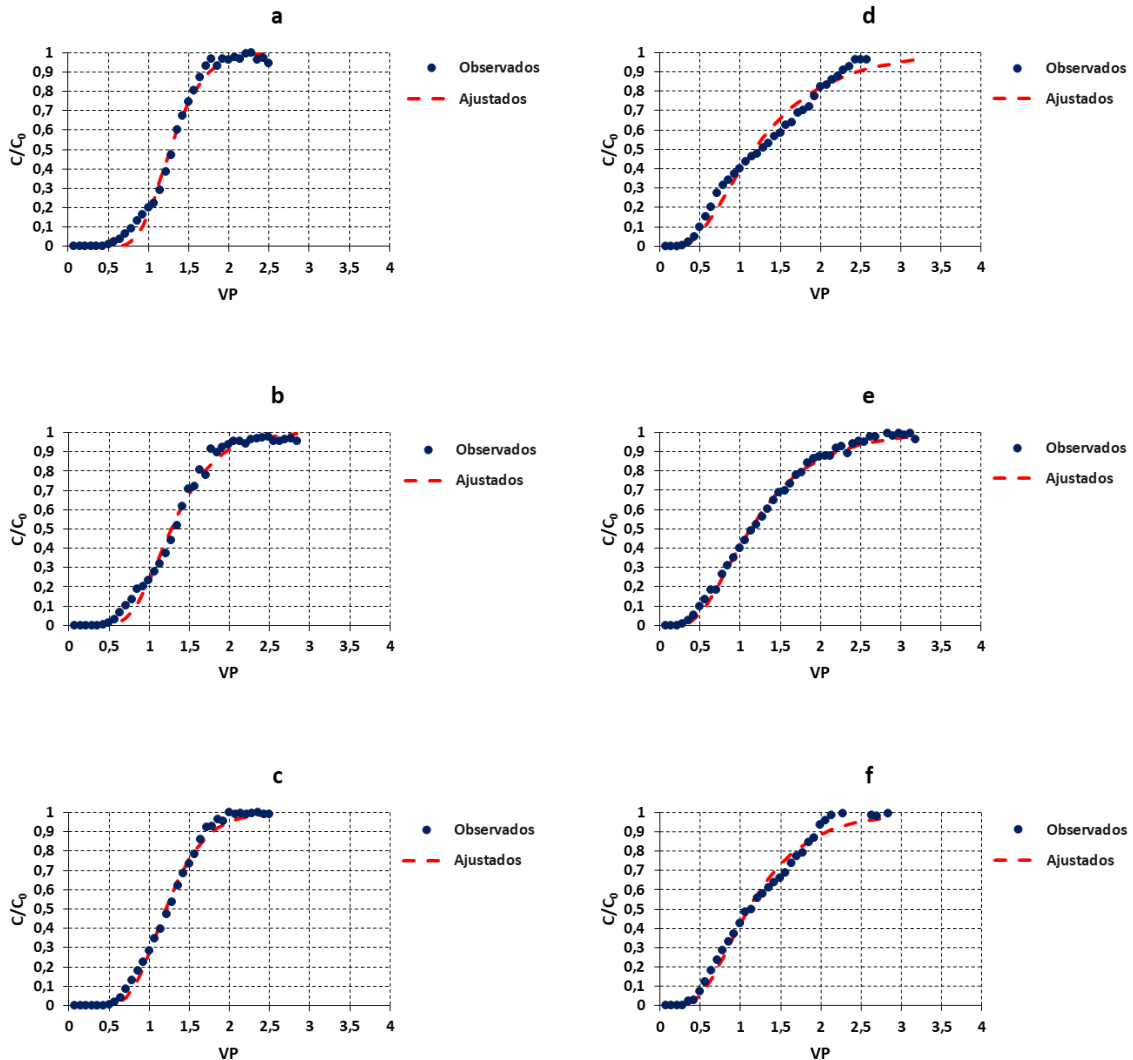


Figura 14. Breakthrough curves do íon potássio nos tratamentos T_250_M2 (a, b, c) e T_450_M2 (d, e, f), ambos apresentados em triplicata.

Em valores gerais, considerando todas as BTC's ajustadas, o maior valor de R foi obtido mediante ao ajuste da curva a do tratamento controle (Tabela 8 e Figura 10a), contudo em termos médios o valor mais alto desse parâmetro foi obtido em T_250_M2. Porém, de acordo com a ANOVA o fator de retardamento do íon potássio em todos os tratamentos pode ser considerado estatisticamente igual (Tabela 9) (Figura 15)

Tabela 9. Quadro da análise de variância resumida para fator de retardamento (R), número de Peclet (P) e coeficiente de dispersão (D).

Fonte de Variação	valor <i>p</i>		
	R	P	D
Matéria Prima (MP)	0,3974 ^{ns}	0,0733 ^{ns}	0,38 ^{ns}
Temperatura (T)	0,9358 ^{ns}	0,8929 ^{ns}	0,8125 ^{ns}
Tempo de incubação (TI)	0,9116 ^{ns}	0,6978 ^{ns}	0,9745 ^{ns}
MP x T	0,3032 ^{ns}	0,0441*	0,0062**
MP x TI	0,8645 ^{ns}	0,0275*	0,0084**
T x TI	0,0247 *	0,0068**	0,0074**
MP x T x TI	0,5167 ^{ns}	0,1677 ^{ns}	0,3491 ^{ns}
Controle x (MP x T x TI)	0,615 ^{ns}	0,1153 ^{ns}	0,1144 ^{ns}

“ns” não significativo a 5% no teste F, “*” significativo a 5 %, “**” significativo a 1 %.

Tabela 10. Desdobramento do efeito do fator tempo de incubação dentro de temperatura e vice-versa para o fator de retardamento (R).

Interação	Valor <i>p</i>
	R
Temperatura: M0	0,0902 ^{ns}
Temperatura:M2	0,1112 ^{ns}
Tempo de incubação: 250 °C	0,1156 ^{ns}
Tempo de incubação: 450 °C	0,0866 ^{ns}

“ns”: não significativo a 5 % no teste F.

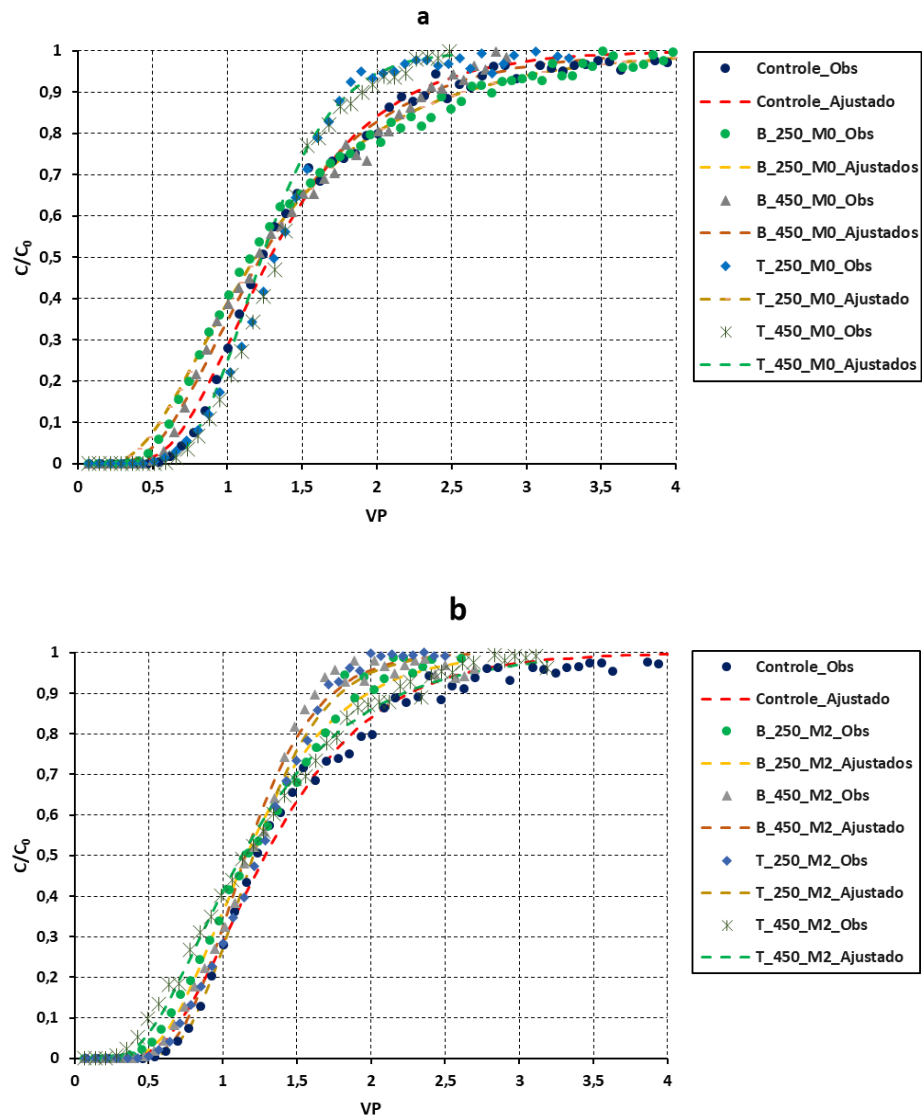


Figura 15. Comparação entre as *Breakthrough curves* melhor ajustadas (R^2) em M0 (a) e M2 (b).

4.2.2. Número de Peclet (P) e Coeficiente de dispersão (D)

O *Peclet Number* (P) e o coeficiente de dispersão (D) são parâmetros que ajudam a entender como ocorre o transporte de um soluto no solo por fatores mais relacionados às suas propriedades físicas. Nesse sentido, na presente seção serão abordadas as diferenças apresentadas em P e D buscando estabelecer relações com as alterações ocorridas no solo após a aplicação dos diferentes tipos de biochar. Além disso serão esclarecidas as aplicações práticas que as eventuais diferenças nesses parâmetros entre os tratamentos podem acarretar na dinâmica do potássio.

4.2.2.1. Efeito do biochar no número de Peclet

Pela Tabela 9 pode-se notar que os valores obtidos pelo ajuste, em relação ao *Peclet Number* (P), não apresentaram diferenças estatísticas entre o solo controle e os condicionados com o *biochar* nos diferentes tempos de incubação ($p \geq 0,05$). Com isso, é possível inferir que a incorporação do *biochar* a partir dessas diferentes matérias primas, não alterou a relação entre o transporte convectivo-dispersivo e difusivo do K^+ no solo.

Tendo em vista que a aplicação dos *biochars* reduziu significativamente a densidade do solo nas colunas condicionadas em relação ao controle (Tabela 11), tal resultado de certa forma chama a atenção e apresenta-se em desacordo com os observados por Silva et al.(2016), que associaram alterações nos valores do *Peclet Number* (P) à diferenças na densidade e, conseqüentemente, na porosidade do solo, ao comparar parâmetros de transporte obtidos em colunas preenchidas com amostras de solo deformada e indeformadas.

Tabela 11. Quadro de ANOVA resumido para densidade das colunas.

Fonte de Variação	valor p Densidade
Matéria Prima (MP)	0 **
Temperatura (T)	0 **
Tempo de incubação (TI)	0 **
MP x T	0,0001 **
MP x TI	0,0025 **
T x TI	0,0731 ns
MP x T x TI	0,0729 ns
Controle x (MP x T x TI)	0 **

“ns” não significativo a 5% no teste F, “*” significativo a 5 %, “***” significativo a 1 %.

Com objetivo de embasar a discussão e elucidar as diferenças no número de Peclet, os valores das densidades das colunas foram submetidos à ANOVA ($p \geq 0,05$) em delineamento inteiramente ao acaso com e sem esquema fatorial.

Dessa forma, foi possível identificar existência de diferença significativa entre pelo menos uma das combinações dos fatores e o controle, bem como efeito significativo da interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise, além de matéria prima e tempo de incubação nesse atributo (Tabela 11).

O teste de comparação de médias assumindo cada combinação das fontes de variação como um tratamento apontou que a aplicação de *biochar*, independente do material de origem, temperatura de pirólise e tempo de incubação reduziu de forma significativa a densidade do solo nas colunas (Tabela 13), sendo assim, como no cálculo da porosidade de cada coluna assumiu-se o valor da densidade de partículas como $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, foi possível afirmar que os solos condicionados apresentaram aumento na porosidade. Verheijen et al (2019) também foram notadas reduções significativas na densidade de colunas preenchidas com solo arenoso condicionado com doses variadas de *biochar*.

De acordo com Leij e van Genuchten (1999), quando o valor do *Peclet Number* (P) é superior a 5,0, a ocorrência do transporte difusivo em relação ao dispersivo é quase desprezível, sendo este último o principal responsável pela razão de mistura do soluto no solo. No presente estudo as médias dos valores de P em todos os tratamentos foram maiores que 5,0 (Tabela 12), indicando que nas condições do ensaio o transporte do K^+ por difusão tanto no solo controle como nos condicionados com *biochar* é praticamente inexistente.

Contudo, notaram-se diferenças significativas nos valores de P decorrentes da combinação dos fatores matéria-prima e temperatura de pirólise, matéria-prima e tempo de incubação, bem como temperatura de pirólise e

tempo de incubação. De um ponto de vista prático, o desdobramento do efeito dessa última interação não faz tanto sentido, uma vez que contabiliza de forma conjunta o resultado de duas matérias-primas diferentes, e por esse motivo não foi analisado.

Tabela 12. Médias dos parâmetros de transporte do íon potássio aplicado via vinhaça em solos condicionados com biochar de torta de filtro e bagaço de cana-de-açúcar.

Matéria Prima	Temperatura	Tempo de incubação	Parâmetro		
			R	P	D*
Controle	-	-	1,19	7,68	3,68
	250 ° C	M0	1,11	5,34	4,84
Bagaço de cana		M2	1,16	12,19	1,80
	450 ° C	M0	1,20	11,72	1,14
M2		1,14	13,56	0,74	
	250 ° C	M0	1,14	15,81	1,76
Torta de filtro		M2	1,25	22,23	1,27
	450 ° C	M0	1,21	22,77	0,52
M2		1,11	6,02	5,05	

* expresso em $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$. R : Fator de retardamento; P: número de Peclet; D: coeficiente de dispersão.

Embora o transporte difusivo do K^+ exerça pouca influência no deslocamento desse íon nas condições do experimento, as diferenças significativas encontradas nos desdobramentos das interações entre os fatores de tratamento nos valores de P (Tabela 9) permitem uma análise a respeito da influência do transporte convectivo na dinâmica do potássio em solos condicionados com *biochar*.

O desdobramento do efeito das matérias-primas dentro de cada temperatura de pirólise e vice-versa permitiram concluir que nas colunas condicionadas com os *biochars* pirolisados a 250°C o transporte por fluxo de massa é mais intenso naquelas preenchidas com o *biochar* de torta de filtro, por outro lado, as que receberam a aplicação dos materiais produzidos a 450°C apresentaram número de Peclet estatisticamente iguais entre as matérias-primas, neste caso a intensidade do transporte convectivo nestas é semelhante (Tabela 14).

Tal comportamento pode ser explicado pelos resultados obtidos por Verheijen et al. (2019), que notaram forte correlação entre a redução da densidade do solo e o aumento capacidade de retenção de água (CRA). No presente trabalho as reduções mais intensas na densidade do solo foram promovidas por B_250, dessa forma de acordo com o que concluíram esses autores é possível inferir que houve um aumento na CRA das colunas condicionadas com esse tipo de *biochar* e, portanto, com mais água sendo armazenada nessas, menor foi a intensidade do fluxo de massa, consequentemente menor a intensidade do transporte de potássio por esse mecanismo.

Tabela 13. Comparação entre as densidades médias das colunas de solo condicionados com *biochar* de torta de filtro (T) e bagaço de cana-de-açúcar (B), pirolisados a 250 e 450 °C, incubados por 0 (M0) e 2 (M2) meses.

Controle	1,356	a
T_450_M0	1,302	b
T_250_M0	1,28	bc
T_250_M2	1,274	bc
T_450_M2	1,263	cd
B_450_M0	1,241	d
B_250_M0	1,191	e
B_450_M2	1,188	e
B_250_M2	1,138	f

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Analisando o efeito da temperatura dentro de cada matéria-prima, foi possível notar que não houve diferença estatística no P em nenhuma dos casos, ou seja, a intensidade do fluxo de massa em solos condicionados

com *biochar* produzido a partir da mesma matéria-prima, porém em diferentes temperaturas de pirólise é a mesma. Em termos práticos não há diferenças no transporte convectivo do potássio nas colunas que receberam *biochar* da mesma matéria-prima, independente da temperatura de pirólise (Tabela 14).

Tabela 14. Comparação de médias do número de Peclet (P) sob o efeito da interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise.

Matéria-prima	Temperatura de pirólise	
	250 °C	450 °C
Bagaço de Cana	8,76 Ba	12,64 Aa
Torta de filtro	19,02 Aa	14,39 Aa

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

O desdobramento das matérias-primas dentro dos tempos de incubação e vice-versa apresentaram o mesmo comportamento da interação matéria-prima/temperatura de pirólise. Com 0 meses de incubação os solos que receberam aplicação de *biochar* de torta de filtro apresentaram maiores valores de P e, conseqüentemente, a intensidade do fluxo de massa atuando no deslocamento de K^+ , pode ser considerada maior. Contudo, após 2 meses de incubação os valores de P são considerados estatisticamente iguais, sendo assim não diferença na intensidade do transporte convectivo de potássio entre os diferentes *biochars* (Tabela 15).

Ambos os *biochars* não apresentaram diferenças significativas no *Peclet Number* ao se comparar os diferentes tempos de incubação. Tal fato significa que nas condições do experimento o tempo de interação do *biochar* com o solo não exerceu influência na intensidade do transporte do potássio por fluxo de massa (Tabela 15).

Tabela 15. Comparação de médias do número de Peclet (P) sob o efeito da interação entre matéria-prima e tempo de incubação.

Matéria-prima	Tempo de incubação	
	0 meses	2 meses
Bagaço de Cana	8,53 Ba	12,87 Aa
T. filtro	19,29 Aa	14,13 Aa

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Embora no presente estudo não tenha sido mensurada a permeabilidade da água nas colunas, estudos anteriores mostram que a aplicação de *biochar* pode promover seu aumento ou redução dependendo da textura do solo bem como das características do *biochar* aplicado (Lim et al., 2016). De acordo com Lim et al. (2016) a aplicação de diferentes tipos de *biochar* reduziu a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) em solos arenosos em diferentes níveis, sendo assim como no presente estudo foram aplicados *biochars* oriundos de matérias-primas distintas em solo arenoso, possivelmente houve alterações na condutividade hidráulica do solo saturado entre os tratamentos que culminaram em mudanças na movimentação da água nas colunas e, conseqüentemente, no transporte do potássio nestas. Esses autores atribuem tal comportamento ao aumento na tortuosidade do solo promovido pela aplicação do *biochar*.

Os valores médios de P obtidos nas BTCs do presente estudo contrastam com os resultados encontrados por Basso e Kiang (2017). Aplicando vinhaça em solo arenoso (65,6% de areia, 7,3% de silte, 27% de argila) esses autores obtiveram valores médios de 158, enquanto que no atual experimento os valores não ultrapassaram 22,77. A

explicação para tal fato está na CTC cerca de quatro vezes menor encontrada no solo utilizado por tais autores em comparação às misturas de solo mais *biochar* (Tabela 7), dessa forma, com menos cargas para reter o potássio aplicado via vinhaça o transporte por convecção torna-se mais intenso de modo a favorecer maior deslocamento do íon por consequência do movimento da água.

4.2.2.2. Efeito do *biochar* no coeficiente de dispersão

A ausência da dispersão hidrodinâmica ($D = 0 \text{ cm}^2 \text{ min}^{-1}$) no transporte do potássio no solo proporcionaria uma mudança brusca na concentração relativa desse íon (de $C/C_0 = 0$ a $C/C_0 = 1$) na solução efluente no momento em que fosse coletado o volume acumulado equivalente a um volume de poro ($VP=1$) após transição do fluxo de água destilada para vinhaça nas colunas, fazendo com que as curvas de chegada (BTC's) formassem um ângulo de 90° com o eixo x (Leij e Van Genuchten, 1999; Nielsen e Biggar, 1962).

Tal afirmação permitiu inferir que a medida em que o valor desse parâmetro é incrementado ocorre maior espalhamento do íon, ou seja, mistura do soluto com a matriz do solo. Em termos práticos significa que quanto maior for o coeficiente de dispersão do potássio mais distribuído e misturado ao solo, estará esse nutriente, podendo criar mais resistência ao seu deslocamento vertical e, conseqüentemente reduzir possíveis perdas por lixiviação.

Pela Tabela 9 pode-se verificar que não houve diferenças estatísticas significativas ($p \geq 0,05$) entre os valores do D obtidos nas colunas condicionadas com *biochar* e as colunas controle, assim como o efeito da interação tripla entre os fatores de tratamento também não foi significativo. Por outro lado, foram observados efeito significativo nas interações entre matéria-prima e temperatura de pirólise, matéria prima e tempo de incubação, bem como temperatura de pirólise e tempo de incubação. Pelos motivos anteriormente supracitados no caso do *Peclet number*, o desdobramento da significância e análise aprofundada desta última interação também não foi realizada para o coeficiente de dispersão.

Quando produzidos à temperatura de 250°C , o *biochar* oriundo do bagaço de cana proporcionou maior valor do coeficiente de dispersão do potássio em média (Tabela 16). Tal resultado pode estar atrelado às diferenças na densidade e estrutura física dos materiais aplicadas ao solo. Embora ambos tenham sido peneirado em malha 2 mm e aplicados nas mesmas doses, a densidade cerca de quatro vezes menor apresentada pelo *biochar* de bagaço (Tabela 2) fez com que o volume que o mesmo ocupou na mistura solo/*biochar* fosse maior, alterando de forma mais intensa a rede de poros e tortuosidade do solo (Lim et al., 2016) na coluna de modo a oferecer mais “caminhos” para que o potássio da vinhaça se espalhasse pelo solo. Contudo, quando a temperatura de pirólise foi 450°C o comportamento não se repetiu e o valor do D para o K^+ em colunas condicionadas com os *biochars* de bagaço e torta de filtro nessa temperatura são considerados estatisticamente iguais.

Tabela 16. Comparação de médias do coeficiente de dispersão (D) sob o efeito da interação entre matéria-prima e temperatura de pirólise.

Matéria Prima	Temperatura de Pirólise	
	250 °C	450 °C
Bagaço de Cana	7,06 Aa	3,74 Aa
T. filtro	2,79 Ba	5,89 Aa

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Ao desdobrar-se o efeito de cada temperatura dentro das respectivas matérias-primas não são constatadas diferenças significativas nesse parâmetro (Tabela 16). O fato das principais alterações nas características dos *biochars* decorrentes das diferentes temperaturas de pirólise concentrarem-se em aspectos químicos (Eykelbosh et al., 2015; Speratti et al., 2018; Suliman et al., 2016) pode explicar o efeito insignificante nesse parâmetro mais relacionado a fatores físicos do transporte de potássio no solo.

Submetendo as colunas ao ensaio sem o período de incubação (M0) foi possível observar que o *biochar* oriundo do bagaço de cana proporcionou maiores valores do coeficiente de dispersão do potássio em comparação ao *biochar* de torta de filtro (Tabela 17). A redução acentuada na densidade do solo ocorrida nas colunas condicionadas com biochar de bagaço no tempo de incubação 0 meses em comparação àquelas que receberam aplicação do *biochar* de torta no mesmo tempo (Tabela 13) justifica tal resultado, uma vez que parâmetros de transporte podem sofrer variações decorrentes de diferenças na densidade do solo (Silva et al., 2016). De um ponto de vista prático, este resultado permite inferir que aplicar vinhaça logo após incorporação do biochar de bagaço ao solo pode ser mais vantajoso no que diz respeito ao espalhamento do potássio nas camadas mais superficiais do solo.

Por outro lado, após 2 meses de incubação (M2), o efeito da matéria prima do *biochar* não promoveu mudanças significativas ($p \geq 0,05$) na razão de mistura entre o potássio e a matriz do solo (Tabela 17). Dessa forma, é possível dizer que após esse período de incubação torna-se indiferente a escolha entre as duas matérias primas testadas no presente estudo em aspectos relacionados ao espalhamento do potássio aplicado via vinhaça pela fase sólida do solo.

Tabela 17. Comparação de médias do coeficiente de dispersão (D) sob o efeito da interação entre matéria-prima e tempo de incubação.

Matéria Prima	Tempo de incubação	
	0 meses	2 meses
Bagaço de Cana	7,08 Aa	3,73 Aa
T. filtro	2,68 Ba	6,01 Aa

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Na análise do efeito dos tempos de incubação dentro de uma mesma matéria prima não foram constatadas diferenças significativas no D do íon potássio, ou seja, ao aplicar *biochars* oriundos da mesma matéria prima não há efeito do tempo de incubação no solo nesse parâmetro (Tabela 17). Sendo assim, não há diferença entre aplicar vinhaça imediatamente ou 2 meses após incorporação de um mesmo *biochar* ao solo no que se refere ao padrão do fluxo dispersivo do potássio nas camadas de solo.

Aplicando vinhaça em colunas preenchidas com Latosolo vermelho distrófico (67% de areia, 26% de argila e 7% de silte) com características semelhantes ao utilizado no presente estudos Matos et al. (2013) obtiveram valor de D em torno de $0,057 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$, tal valor é consideravelmente menor que os valores obtidos mediante a aplicação desse resíduo em colunas preenchidas com solo misturado a *biochar* de bagaço de cana e torta de filtro (Tabela 12), representando mais um indício do efeito desse material no coeficiente de dispersão do potássio aplicado via vinhaça ao solo.

De forma semelhante, Basso e Kiang (2017) realizando ensaio das BTC's em colunas de solo com 70% de areia submetidas a aplicação de solução de KCl (1000 mg.L^{-1} de K^+) obtiveram D equivalente a $0,076 \text{ cm}^2.\text{min}^{-1}$ para o íon potássio.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

5.1. Considerações finais

A aplicação de todos os *biochars* testados no presente estudo, apresentaram de maneira geral um efeito positivo nas propriedades físico-químicas do solo. Dentre tais efeitos pode-se destacar: os relevantes incrementos nos níveis de fósforo e cálcio disponíveis promovidos pela aplicação de *biochar* de torta de filtro; o aumento nos teores de potássio, com exceção do tratamento T_450 no qual foram observadas pequenas reduções em tais valores; e o incremento nas concentrações de magnésio, exceto no tempo zero de incubação para a matéria prima bagaço de cana, no qual houve diminuição deste nutriente no solo.

Além disso, foi possível notar que após 2 meses de incubação no solo todos os *biochars* promoveram o aumento do pH, destaca-se que tal incremento foi maior em solos que receberam *biochar* de torta de filtro, o que por sua vez pode estar relacionado com as maiores elevações na CTC que ocorreram também em tais tratamentos, a combinação da menor temperatura de pirólise com o maior tempo de incubação resultou nos maiores valores deste atributo. Tal resultado também pode estar atrelado ao aumento na MOS que ocorreu em quase todos tratamentos, com exceção de B_450, cujo a aplicação promoveu depleção nos níveis da MOS em ambos os tempos de incubação, estudos mais aprofundando fazem-se necessários para elucidar a possível ocorrência de um efeito primming mediante aplicação de tal material. No que diz respeito à densidade do solo todos os *biochars* aplicados promoveram reduções estatisticamente significativas em relação ao controle, destacam-se reduções mais acentuadas quando foram aplicados *biochars* de bagaço de cana e/ou incubados no solo durante 2 meses.

Dessa forma é possível recomendar o uso de qualquer um dos *biochars* testados no presente trabalho como condicionador de solo, contudo a escolha da matéria prima, temperatura de pirólise e tempo de incubação deve levar em conta o objetivo que se almeja com sua aplicação.

Embora aplicação dos diferentes de tipos de *biochar* tenha, em alguns casos, melhorado propriedades físico-químicas do solo que favorecem a interação do potássio com o mesmo, tais como CTC, pH e MOS a análise estatística apontou que não houve diferença no fator de retardamento do K^+ aplicado via vinhaça entre os solos condicionados e o solo controle. Tal fato é corroborado pelo comportamento gráfico muito semelhante das BTC's obtidas em todos os tratamentos. Acredita-se que as alterações promovidas pela aplicação dos *biochars* no solo não tenham sido suficientemente intensas a ponto de aumentar a capacidade deste em adsorver o potássio.

Além disso, a alta concentração desse íon (4250 ppm), somado a outros tais como Mg^{2+} e Ca^{2+} na composição da vinhaça contribuíram para tal resultado. Apesar disso, é possível afirmar que em todos os tratamentos houve interação, mesmo que de baixa intensidade, entre o potássio e a fase sólida do solo ($R > 1$). De um ponto de vista prático não é possível afirmar que tais materiais podem ser utilizados com o objetivo de se evitar a lixiviação de potássio aplicado via vinhaça nas condições do presente experimento. Talvez, numa condição de maior tempo de incubação e/ou outras temperaturas de pirólise os *biochars* de torta de filtro e bagaço de cana possam apresentar desempenho diferente nesse aspecto, estudo em tais condições fazem-se necessário para maior elucidação.

O *Peclet number* obtido em todos os tratamentos indicou que a influência do transporte de potássio por difusão é quase desprezível na dinâmica do mesmo nas condições do estudo. Além disso, observou-se que embora tenham sido notadas diferenças significativas na densidade entre o solo controle e os condicionados com *biochar*, o que promove mudanças na porosidade destes, a relação entre o transporte convectivo-dispersivo (fluxo de massa) e difusivo (gradiente de concentração), expressa pelo *Peclet number*, não foi alterada quando se compararam tais solos.

Contudo, ao analisar o efeito das interações entre matéria prima e temperatura de pirólise notou-se que quando produzido a 250°C o *biochar* de torta de filtro proporciona maiores valores de P, o que pode ser traduzido como um transporte do K⁺ por fluxo de massa ocorrendo mais intensamente, podendo favorecer lixiviação mais intensa desse íon em algumas circunstâncias, sendo assim o *biochar* de bagaço de cana favoreceu em menor intensidade o deslocamento do K⁺ como consequência do movimento da água na coluna em relação ao *biochar* de torta de filtro. Por outro lado, analisando os efeitos das interações entre matéria prima e tempo de incubação, foi observado que apenas no tempo “0 meses” o *biochar* de bagaço de cana apresentou menor valor de P, o que significa menor intensidade do fluxo de massa no transporte do K⁺ comparado aos demais. Em ambos os casos a alta CRA desse material pode ter contribuído para tais resultados, estudos correlacionando o efeito desse tipo de *biochar* em tal atributo do solo com os parâmetros de transporte do potássio fazem-se necessário para maiores constatações.

Semelhante ao que ocorreu com os demais parâmetros também não foram constatadas diferenças estatísticas entre o solo condicionado com *biochar* e o solo controle, em termo práticos isso significa que a aplicação dos *biochars* utilizados nas condições do presente estudo não alteraram de forma significativa o espalhamento do K⁺ aplicado via vinhaça no solo. Por outro lado, o *biochar* de bagaço de cana pirolisado a 250°C proporcionou maiores valores de coeficiente de dispersão do potássio em comparação ao *biochar* de torta produzido sob a mesma condição, o que significa que em tal temperatura o *biochar* de bagaço promove maior mistura do K⁺ com o solo, o que de certa forma pode retardar seu deslocamento em profundidade.

A temperatura de pirólise não teve efeito no valor D em ambas as matérias primas, tal resultado pode estar relacionado com fato das alterações oriundas deste fator nas características do *biochar* serem mais ligadas à fatores químicos. Apenas no tempo de incubação de “0 meses” foi possível observar que o *biochar* de bagaço proporcionou valores mais elevados do D para o K⁺, dessa forma visando obter um maior espalhamento e distribuição desse íon no solo quando aplicado via vinhaça seria recomendado aplicar este tipo de *biochar* e realizar a aplicação da vinhaça logo em seguida.

De uma maneira geral, a aplicação dos *biochars* oriundos de subprodutos da cultura da cana-de-açúcar em latosolo vermelho amarelo de textura arenosa não foi capaz de alterar os parâmetros de transporte do íon potássio aplicado via vinhaça nas condições deste estudo. Contudo, o fato de diversos estudos anteriores demonstrarem inúmeros efeitos positivos nas propriedades do solo tais como aumento do estoque de C no solo, aumento de pH e elevação de CTC acredita-se que a utilização destes materiais pode contribuir de forma relevante para a melhoria da qualidade do solo e é fortemente recomendada. Sendo assim, observando pela perspectiva dos parâmetros de transporte a escolha do tipo de *biochar* bem como o tempo de incubação a ser escolhido na aplicação destes no solo deve levar em conta os objetivos pretendidos com tal utilização.

5.2. Conclusões

Diante dos resultados obtidos e do esquema experimental realizados em condições de laboratório, foi possível concluir que:

- a) A aplicação dos diferentes tipos de *biochar* embora tenha alterado de forma positiva algumas propriedades do solo relacionadas ao transporte de solutos neste, não promoveu alterações significativas nos parâmetros de transporte do íon potássio aplicado via vinhaça em relação ao controle;
- b) Os *biochars* reduziram significativamente a densidade do solo nas colunas, bem como proporcionaram o aumento do pH e da CTC do solo após dois meses de incubação na maioria dos tratamentos;
- c) O *biochar* de torta de filtro proporcionou os maiores valores do *Peclet number*, indicando que na presença deste o deslocamento do potássio por consequência do movimento da água foi mais intenso se comparado aos demais solos condicionados. Por outro lado, não se observaram diferenças significativas na interação do K^+ (efeito adsorptivo) com a matriz do solo, expressa pelo fator de retardamento, entre nenhum dos solos que recebeu aplicação dos *biochars*; e
- d) O *biochar* de bagaço de cana pirolisado a 250°C proporcionou os maiores valores de D dentre os solos condicionados, o que significa que neste tratamento o espalhamento do íon potássio pelo solo foi maior que nos demais, exceto o controle. Contudo o efeito da temperatura dentro da mesma matéria prima foi insignificante para tal parâmetro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcarde, A.R., 2009. *Árvore do conhecimento : Cana-de-açúcar* [WWW Document]. Agência Embrapa de informação e tecnologia. URL https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html (accessed 9.6.21).
- Alvarenga, R., Queiroz, T., 2009. *Produção mais Limpa e Aspectos Ambientais na Indústria Sucroalcooleira*, in: *Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change*. Presented at the International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, p. 10.
- Álvarez-Benedí, J., Isla, T., Cartón, A., 1999. Efecto de la velocidad de flujo en los parámetros de transporte de solutos, in: *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter Rodríguez y C. Tascón Rodríguez., ICIA : Tenerife, pp. 157–161.
- Alves, B.S.Q., Zelaya, K.P.S., Colen, F., Frazão, L.A., Napoli, A., Parikh, S.J., Fernandes, L.A., 2021. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. *Pedosphere* 31, 572–582. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60003-6)
- Amorim, H., Lopes, M., 2009. Sugar cane juice and molasses, beet molasses and sweet sorghum: Composition and usage, in: *The Alcohol Textbook: A Reference for Thebeverage, Fuel, and Industrial Alcohol Industries*. Ingledew WM, Austin GD, Kelsall DR, Kluhsbies C, Nottingham, pp. 39–46.
- Andrade, C.W.L. de, Montenegro, S.M.G.L., Miranda, J.H. de, Montenegro, A.A. de A., Assis, F.M.C.V. de, 2018. SIMULATION OF SODIUM AND POTASSIUM DYNAMICS BY THE HYDRUS 2D MODEL IN A HAPLIC PLANOSOL VIA RESIDUE WATER. *Eng. Agríc.* 38, 874–884. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n6p874-884/2018>
- Azeem, M., Hayat, R., Hussain, Q., Ahmed, M., Pan, G., Ibrahim Tahir, M., Imran, M., Irfan, M., Mehmood-ul-Hassan, 2019. Biochar improves soil quality and N₂-fixation and reduces net ecosystem CO₂ exchange in a dryland legume-cereal cropping system. *Soil and Tillage Research* 186, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.007>
- Basso, J.B., Kiang, C.H., 2017. Retardamento e dispersão hidrodinâmica de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo Itararé no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas* 31, 117–133. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28638>
- Beusch, C., Cierjacks, A., Böhm, J., Mertens, J., Bischoff, W.-A., de Araújo Filho, J.C., Kaupenjohann, M., 2019. Biochar vs. clay: Comparison of their effects on nutrient retention of a tropical Arenosol. *Geoderma* 337, 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.043>
- Blum, S.C., Lehmann, J., Solomon, D., Caires, E.F., Alleoni, L.R.F., 2013. Sulfur forms in organic substrates affecting S mineralization in soil. *Geoderma* 200–201, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.003>
- Brady, N.C., Weil, R.R., 2009. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. Bookman Editora.
- Bresler, E., Dagan, G., 1981. Convective and pore scale dispersive solute transport in unsaturated heterogeneous fields. *Water Resources Research* 17, 1683–1693. <https://doi.org/10.1029/WR017i006p01683>
- Broznić, D., Didović, M.P., Rimac, V., Marinić, J., 2021. Sorption and leaching potential of organophosphorus insecticide dimethoate in Croatian agricultural soils. *Chemosphere* 273, 128563. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128563>
- Cabello, P., Scognamiglio, F., Teran, F., 2009. Tratamento de vinhaça em reator anaeróbio de leite fluidizado. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia* 6, 321–338.

- Campos, T.M., Elbachá, A.T., 1991. Avaliação do fator de retardamento por adsorção no transporte de zinco em solo argilosos, in: Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos. Presented at the REGEO'91, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Rio de Janeiro, pp. 271–282.
- CETESB, 2015. Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola.
- Christofolletti, C.A., Escher, J.P., Correia, J.E., Marinho, J.F.U., Fontanetti, C.S., 2013. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. *Waste Management* 33, 2752–2761. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>
- Conz, R.F., 2015. Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura (text). Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.11.2015.tde-13052015-142608>
- Correia, J.E., 2015. Avaliação da toxicidade da vinhaça tratada quimicamente utilizando *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae) como organismo teste. (Dissertação (mestrado)). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociência de Rio Claro, Rio Claro.
- Cortez, L.A.B., Cruz, C.H. de B., Souza, G.M., Cantarella, H., van Sluys, M.-A., Maciel Filho, R., 2018. Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro. Editora Blucher, São Paulo.
- de Matos, M., Santos, F., Eichler, P., 2020. Chapter 1 - Sugarcane world scenario, in: Santos, F., Rabelo, S.C., De Matos, M., Eichler, P. (Eds.), *Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives*. Academic Press, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00001-9>
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P., 2009. Physical properties of biochar, in: *Biochar for environmental management*. Earthscan, Reino Unido, pp. 33–43.
- EMBRAPA, 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- EMBRAPA, 2017. Manual de métodos de análise de solo. Brasília, DF: Embrapa, 2017.
- Ernani, P.R., Almeida, J.A. de, Santos, F.C. dos, 2007. Potássio, in: *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, MG, p. 1017.
- España-Gamboa, E., Mijangos-Cortes, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernández-Zarate, G., Alzate-Gaviria, L., 2011. Vinasses: characterization and treatments: *Waste Management & Research* 29, 1235–1250. <https://doi.org/10.1177/0734242X10387313>
- Eykelbosh, A.J., Johnson, M.S., Couto, E.G., 2015. Biochar decreases dissolved organic carbon but not nitrate leaching in relation to vinasse application in a Brazilian sugarcane soil. *Journal of Environmental Management* 149, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.033>
- Eykelbosh, A.J., Johnson, M.S., Queiroz, E.S. de, Dalmagro, H.J., Couto, E.G., 2014. Biochar from Sugarcane Filtercake Reduces Soil CO₂ Emissions Relative to Raw Residue and Improves Water Retention and Nutrient Availability in a Highly-Weathered Tropical Soil. *PLOS ONE* 9, e98523. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098523>
- Fuess, L.T., Garcia, M.L., Zaiat, M., 2018. Seasonal characterization of sugarcane vinasse: Assessing environmental impacts from fertirrigation and the bioenergy recovery potential through biodigestion. *Science of The Total Environment* 634, 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.326>
- Ghorbani, M., Asadi, H., Abrishamkesh, S., 2019. Effects of rice husk biochar on selected soil properties and nitrate leaching in loamy sand and clay soil. *International Soil and Water Conservation Research* 7, 258–265. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.005>

- Giagnoni, L., Maienza, A., Baronti, S., Vaccari, F.P., Genesio, L., Taiti, C., Martellini, T., Scodellini, R., Cincinelli, A., Costa, C., Mancuso, S., Renella, G., 2019. Long-term soil biological fertility, volatile organic compounds and chemical properties in a vineyard soil after biochar amendment. *Geoderma* 344, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.011>
- Gonçalves, A.D.M. de A., 2007. Efeito da temperatura no transporte dos íons potássio e nitrato no solo (Dissertação (mestrado)). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. <https://doi.org/10.11606/D.11.2007.tde-12062007-113754>
- Grecco, K.L., 2019. Efeito da composição físico-química e mineralógica de solos sobre a dinâmica dos íons nitrato, fósforo e potássio (text). Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/T.11.2019.tde-17092019-115255>
- IAC, 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agrônomo, Campinas.
- Kätterer, T., Roobroeck, D., Andrén, O., Kimutai, G., Karlton, E., Kirchmann, H., Nyberg, G., Vanlauwe, B., Röing de Nowina, K., 2019. Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya. *Field Crops Research* 235, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.015>
- Khan, A.Z., Khan, S., Ayaz, T., Brusseau, M.L., Khan, M.A., Nawab, J., Muhammad, S., 2020. Popular wood and sugarcane bagasse biochars reduced uptake of chromium and lead by lettuce from mine-contaminated soil. *Environmental Pollution* 263, 114446. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114446>
- Kolahchi, Z., Jalali, M., 2006. Simulating leaching of potassium in a sandy soil using simple and complex models. *Agricultural Water Management* 85, 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.03.011>
- Kotlar, A.M., Wallace Pereira de Carvalho, H., Iversen, B.V., de Jong van Lier, Q., 2020. Nitrate leaching from layered double hydroxides in tropical and temperate soils. *Applied Clay Science* 184, 105365. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105365>
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009. Science and technology, in: *Biochar for environmental management*. Earthscan, Reino Unido, pp. 1–12.
- Lei, Z., Li, Q., Song, X., Wang, W., Zhang, Z., Peng, C., Tian, L., 2018. Biochar mitigates dissolved organic carbon loss but does not affect dissolved organic nitrogen leaching loss caused by nitrogen deposition in Moso bamboo plantations. *Global Ecology and Conservation* 16, e00494. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00494>
- Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 1999. Principles of Solute Transport, in: *Agricultural Drainage*. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 331–359. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c9>
- Li, T., Liang, J., Chen, X., Wang, H., Zhang, S., Pu, Y., Xu, X., Li, H., Xu, J., Wu, X., Liu, X., 2021. The interacting roles and relative importance of climate, topography, soil properties and mineralogical composition on soil potassium variations at a national scale in China. *CATENA* 196, 104875. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104875>
- Liang, X., Rengasamy, P., Smernik, R., Mosley, L.M., 2021. Does the high potassium content in recycled winery wastewater used for irrigation pose risks to soil structural stability? *Agricultural Water Management* 243, 106422. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106422>
- Lim, T.J., Spokas, K.A., Feyereisen, G., Novak, J.M., 2016. Predicting the impact of biochar additions on soil hydraulic properties. *Chemosphere, Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors* 142, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.069>

- Lopes, M.L., Paulillo, S.C. de L., Godoy, A., Cherubin, R.A., Lorenzi, M.S., Giometti, F.H.C., Bernardino, C.D., Amorim Neto, H.B. de, Amorim, H.V. de, 2016. Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. *Braz. J. Microbiol.* 47, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.003>
- Matos, A.T. de, Gariglio, H.A. de A., Lo Monaco, P.A.V., 2013. Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 17, 743–749. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700008>
- Melati, R., Schmatz, A., Pagnocca, F., Contiero, J., Brienzo, M., 2017. Sugarcane bagasse: Production, composition, properties, and feedstock potential, in: *Sugarcane: Production Systems, Uses and Economic Importance*. Nova Science Publishers, pp. 1–38.
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W., 1962. Miscible Displacement: III. Theoretical Considerations. *Soil Science Society of America Journal* 26, 216–221. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600030010x>
- Nir, S., Zadaka-Amir, D., Kartaginer, A., Gonen, Y., 2012. Simulation of adsorption and flow of pollutants in a column filter: Application to micelle–montmorillonite mixtures with sand. *Applied Clay Science, Clay and Water Treatment* 67–68, 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2011.09.017>
- Petter, F.A., Ferreira, T.S., Sinhoro, A.P., Lima, L.B., Almeida, F.A., Pacheco, L.P., Silva, A.F., 2019. Biochar Increases Diuron Sorption and Reduces the Potential Contamination of Subsurface Water with Diuron in a Sandy Soil. *Pedosphere* 29, 801–809. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60434-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60434-X)
- Petter, F.A., Madari, B.E., Silva, M.A.S. da, Carneiro, M.A.C., Carvalho, M.T. de M., Marimon Júnior, B.H., Pacheco, L.P., 2012. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 47, 699–706. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000500010>
- Piccolla, C.D., 2013. Características químicas de biocarvões produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar e a disponibilidade de fósforo no solo (text). Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.11.2013.tde-17122013-120242>
- Pina, E.A., Palacios-Bereche, R., Chavez-Rodriguez, M.F., Ensinas, A.V., Modesto, M., Nebra, S.A., 2017. Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations. *Energy* 138, 1263–1280. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.054>
- Prado, R. de M., Caione, G., Campos, C.N.S., 2013. Filter Cake and Vinasse as Fertilizers Contributing to Conservation Agriculture. *Applied and Environmental Soil Science* 2013, e581984. <https://doi.org/10.1155/2013/581984>
- Purakayastha, T.J., Bera, T., Bhaduri, D., Sarkar, B., Mandal, S., Wade, P., Kumari, S., Biswas, S., Menon, M., Pathak, H., Tsang, D.C.W., 2019. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security. *Chemosphere* 227, 345–365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.170>
- Rabelo, S.C., da Costa, A.C., Vaz Rossel, C.E., 2015. Chapter 17 - Industrial Waste Recovery, in: Santos, F., Borém, A., Caldas, C. (Eds.), *Sugarcane*. Academic Press, San Diego, pp. 365–381. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802239-9.00017-7>
- Rein, P., 2016. *Cane sugar engineering*, 2nd ed. Verlag Dr. Albert Bartens KG, Berlin - Germany.
- Rosolem, C.A., Steiner, F., 2017. Effects of soil texture and rates of K input on potassium balance in tropical soil. *European Journal of Soil Science* 68, 658–666. <https://doi.org/10.1111/ejss.12460>

- Rossetto, R., Santiago, A.D., 2009. Adubação - resíduos alternativos [WWW Document]. Agência Embrapa de informação e tecnologia. URL https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html (accessed 9.6.21).
- Roth, K., 1996. Lecture notes in soil physics: version 3.2. University of Hohenheim, Stuttgart.
- RStudio Team, 2020. RStudio: Integrated Development Environment for R. RStudio, PBC, Boston, MA.
- Santana, V.S., Fernandes Machado, N.R.C., 2008. Photocatalytic degradation of the vinasse under solar radiation. *Catalysis Today, Selected Contributions of the XX Ibero-American Symposium of Catalysis* 133–135, 606–610. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2007.12.131>
- Silva, L.P. da, 2013. Influência do íon acompanhante nos parâmetros de transporte do nitrato no solo (Dissertação (mestrado)). Universidade de São Paulo, Piracicaba. <https://doi.org/10.11606/D.11.2013.tde-26062013-110203>
- Silva, L.P. da, van Lier, Q. de J., Correa, M.M., Miranda, J.H. de, Oliveira, L.A. de, 2016. Retention and Solute Transport Properties in Disturbed and Undisturbed Soil Samples. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20151045>
- Šimůnek, J., Šejna, M., Saito, H., Sakai, M., van Genuchten, M.Th., 2013. Hydrus 1D. Department of environmental sciences, University of California Riverside, Riverside, California.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., Toride, N., Leij, F.J., 2011. STANMOD. U. S. Salinity Laboratory, U.S. Departmente of Agriculture, Riverside, California.
- Singh, B., Cowie, A., 2010. Characterisation and evaluation of biochars for their application as soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* 48, 516–525. <https://doi.org/10.1071/SR10058>
- Speratti, A.B., Johnson, M.S., Sousa, H.M., Dalmagro, H.J., Couto, E.G., 2018. Biochar feedstock and pyrolysis temperature effects on leachate: DOC characteristics and nitrate losses from a Brazilian Cerrado Arenosol mixed with agricultural waste biochars. *Journal of Environmental Management* 211, 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.052>
- Suliman, W., Harsh, J.B., Abu-Lail, N.I., Fortuna, A.-M., Dallmeyer, I., Garcia-Perez, M., 2016. Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on biochar bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy* 84, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.010>
- Th. van Genuchten, M., Šimunek, J., J. Leij, F., Toride, N., Šejna, M., 2012. STANMOD: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE* 55, 1355. <https://doi.org/10.13031/2013.42247>
- Verheijen, F.G.A., Zhuravel, A., Silva, F.C., Amaro, A., Ben-Hur, M., Keizer, J.J., 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma* 347, 194–202. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.044>
- Vilela, N.M.S., Thebaldi, M.S., Leal, B.D.P., Silva, A.V., Martins, I.P., 2018. TRANSPORT PARAMETERS OF POTASSIUM FROM DIFFERENT SOURCES IN SOIL COLUMNS. *Eng. Agríc.* 38, 135–141. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n1p135-141/2018>
- Wang, H., 2002. Describing and Predicting Breakthrough Curves for non-Reactive Solute Transport in Statistically Homogeneous Porous Media (Thesis (Degree of Doctor of Philosophy in Crop and Soil Environmental Science)). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- Widowati, W., Asnah, A., Utomo, W.H., 2014. The use of biochar to reduce nitrogen and potassium leaching from soil cultivated with maize. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 2, 211–218. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2014.021.211>

- Wierenga, P.J., Genuchten, M.T.V., 1989. Solute Transport Through Small and Large Unsaturated Soil Columns. *Groundwater* 27, 35–42. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1989.tb00005.x>
- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., Zimmerman, A.R., 2012. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere* 89, 1467–1471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>
- Zeeshan, M., Ahmad, W., Hussain, F., Ahmad, W., Numan, M., Shah, M., Ahmad, I., 2020. Phytostabilization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *Journal of Cleaner Production* 255, 120318. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120318>
- Zelaya, K.P.S., Alves, B.S.Q., Colen, F., Frazão, L.A., Sampaio, R.A., Pegoraro, R.F., Fernandes, L.A., 2019. Biochar in sugar beet production and nutrition. *Ciência Rural* 49. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180684>
- Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., Han, L., 2020. Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. *Bioresource Technology* 296, 122318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122318>

ANEXOS

Anexo A1. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C_0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o controle na repetição 1.

Controle 1		
VP	C/Co	Ajustados
0,0772431	0	0
0,1544863	0	0
0,2317294	0	0
0,3089725	0	0
0,3862156	0	0,002
0,4634588	0,000210526	0,009
0,5407019	0,003552632	0,023
0,617945	0,018315789	0,047
0,6951882	0,042105263	0,081
0,7724313	0,074736842	0,124
0,8496744	0,127368421	0,174
0,9269175	0,203157895	0,23
1,0041607	0,278947368	0,289
1,0814038	0,362105263	0,348
1,1586469	0,433684211	0,407
1,2358901	0,506315789	0,464
1,3131332	0,573684211	0,518
1,3903763	0,606315789	0,569
1,4676194	0,654736842	0,616
1,5448626	0,716842105	0,659
1,6221057	0,685263158	0,699
1,6993488	0,731578947	0,734
1,776592	0,738947368	0,766
1,8538351	0,750526316	0,795
1,9310782	0,793684211	0,821
2,0083213	0,798947368	0,843
2,0855645	0,863157895	0,863
2,1628076	0,889473684	0,881
2,2400507	0,877894737	0,896
2,3172939	0,891578947	0,91
2,394537	0,944210526	0,922
2,4717801	0,884210526	0,932
2,5490232	0,918947368	0,941
2,6262664	0,911578947	0,949
2,7035095	0,938947368	0,956
2,7807526	0,962105263	0,962
2,8579958	0,964210526	0,967
2,9352389	0,931578947	0,971

Anexo A2. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C_0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o controle na repetição 2.

Controle 2		
VP	C/Co	Ajustados
0,0805636	0,0002	0
0,1611272	0	0
0,2416909	0	0
0,3222545	0	0
0,4028181	0,00015	0,003
0,4833817	0,0002	0,011
0,5639453	0,000425	0,028
0,644509	0,00355	0,057
0,7250726	0,021	0,098
0,8056362	0,074	0,148
0,8861998	0,153	0,206
0,9667634	0,236	0,268
1,0473271	0,332	0,332
1,1278907	0,48	0,397
1,2084543	0,506	0,459
1,2890179	0,557	0,519
1,3695815	0,632	0,574
1,4501452	0,612	0,625
1,5307088	0,712	0,672
1,6112724	0,73	0,714
1,691836	0,78	0,751
1,7723996	0,8	0,784
1,8529632	0,835	0,814
1,9335269	0,854	0,839
2,0140905	0,891	0,862
2,0946541	0,782	0,881
2,1752177	0,855	0,898
2,2557813	0,819	0,913
2,336345	0,902	0,925
2,4169086	0,915	0,936
2,4974722	0,947	0,946
2,5780358	0,932	0,954
2,6585994	0,93	0,961
2,7391631	0,955	0,966
2,8197267	0,95	0,971
2,9002903	0,961	0,976
2,9808539	0,956	0,979
3,0614175	0,969	0,983

3,012482	1,062105263	0,975
3,0897251	0,964210526	0,979
3,1669683	0,958947368	0,982
3,2442114	0,950526316	0,984
3,3214545	0,964210526	0,986
3,3986977	0,966315789	0,988
3,4759408	0,975789474	0,99
3,5531839	0,973684211	0,991
3,630427	0,953684211	0,992
3,7076702	1,076842105	0,993
3,7849133	1,055789474	0,994
3,8621564	0,976842105	0,995
3,9393996	0,972631579	0,996
4,0166427	1,025263158	0,996
4,0938858	1,06	0,997
4,1711289	0,992631579	0,997
4,2483721	1,030526316	0,998
4,3256152	1,062105263	0,998
4,4028583	1,123157895	0,998
4,4801015	1,066315789	0,999
4,5573446	0,991578947	0,999
4,6345877	0,989473684	0,999
4,7118309	1,015789474	0,999
4,789074	0,995789474	0,999
4,8663171	0,993684211	0,999
4,9435602	1,021052632	0,999
5,0208034	1,012631579	0,999
5,0980465	1,025263158	1
5,1752896	0,975789474	1

3,1419812	0,979	0,985
3,2225448	0,92	0,987
3,3031084	0,986	0,989
3,383672	0,978	0,991
3,4642356	0,972	0,992
3,5447993	0,993	0,994
3,6253629	0,966	0,995
3,7059265	0,974	0,995
3,7864901	0,97	0,996
3,8670537	0,992	0,997
3,9476174	0,852	0,997
4,028181	0,982	0,998
4,1087446	0,901	0,998
4,1893082	0,98	0,998
4,2698718	0,968	0,999
4,3504355	0,987	0,999
4,4309991	0,973	0,999

Anexo A3. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C₀) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o controle na repetição 3.

Controle 3		
VP	C/Co	Ajustados
0,0758676	0	0
0,1517353	0	0
0,2276029	0	0,005
0,3034705	0,001225	0,019
0,3793381	0,011425	0,046
0,4552058	0,047	0,085
0,5310734	0,092	0,131
0,606941	0,141	0,183
0,6828087	0,211	0,237

Anexo A4. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C₀) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M0 na repetição 1.

B_250_M0 1		
VP	C/Co	Ajustados
0,0675115	0	0
0,1350229	0	0
0,2025344	0	0,001
0,2700459	0	0,005
0,3375573	0,000486111	0,016
0,4050688	0,005902778	0,035
0,4725803	0,024328704	0,062
0,5400917	0,059259259	0,096
0,6076032	0,09537037	0,135

0,7586763	0,252	0,291
0,8345439	0,326	0,345
0,9104115	0,382	0,396
0,9862792	0,439	0,445
1,0621468	0,494	0,491
1,1380144	0,541	0,534
1,213882	0,613	0,574
1,2897497	0,665	0,611
1,3656173	0,7392	0,645
1,4414849	0,786	0,676
1,5173526	0,719	0,704
1,5932202	0,728	0,731
1,6690878	0,757	0,755
1,7449554	0,886	0,777
1,8208231	0,819	0,796
1,8966907	0,843	0,815
1,9725583	0,81	0,831
2,048426	0,855	0,846
2,1242936	0,846	0,86
2,2001612	0,859	0,872
2,2760288	0,843	0,884
2,3518965	0,838	0,894
2,4277641	0,854	0,904
2,5036317	0,857	0,912
2,5794993	0,887	0,92
2,655367	0,893	0,927
2,7312346	0,889	0,933
2,8071022	0,919	0,939
2,8829699	0,897	0,945
2,9588375	0,91	0,95
3,0347051	0,909	0,954
3,1105727	0,928	0,958
3,1864404	0,914	0,962
3,262308	0,957	0,965
3,3381756	0,938	0,968
3,4140433	0,955	0,971
3,4899109	0,99	0,973
3,5657785	0,925	0,976
3,6416461	0,964	0,978
3,7175138	0,96	0,98
3,7933814	0,957	0,981
3,869249	0,962	0,983
3,9451166	1,023	0,985
4,0209843	0,981	0,986
4,0968519	0,959	0,987

0,6751147	0,156481481	0,177
0,7426261	0,2	0,221
0,8101376	0,262962963	0,266
0,877649	0,317592593	0,31
0,9451605	0,361111111	0,354
1,012672	0,407407407	0,397
1,0801834	0,462962963	0,438
1,1476949	0,49537037	0,477
1,2152064	0,536111111	0,514
1,2827178	0,575	0,549
1,3502293	0,622222222	0,582
1,4177408	0,62962963	0,613
1,4852522	0,652777778	0,641
1,5527637	0,680555556	0,668
1,6202752	0,705555556	0,693
1,6877866	0,727777778	0,716
1,7552981	0,743518519	0,738
1,8228096	0,751851852	0,758
1,890321	0,769444444	0,776
1,9578325	0,796296296	0,794
2,025344	0,778703704	0,809
2,0928554	0,827777778	0,824
2,1603669	0,812962963	0,838
2,2278784	0,839814815	0,85
2,2953898	0,816666667	0,862
2,3629013	0,837962963	0,872
2,4304127	0,887962963	0,882
2,4979242	0,858333333	0,891
2,5654357	0,876851852	0,9
2,6329471	0,913888889	0,907
2,7004586	0,916666667	0,914
2,7679701	0,898148148	0,921
2,8354815	0,925925926	0,927
2,902993	0,926851852	0,933
2,9705045	0,932407407	0,938
3,0380159	0,938888889	0,943
3,1055274	0,927777778	0,947
3,1730389	0,969444444	0,951
3,2405503	0,938888889	0,955
3,3080618	0,938888889	0,958
3,3755733	0,969444444	0,961
3,4430847	0,962962963	0,964
3,5105962	1	0,967
3,5781077	0,987037037	0,97
3,6456191	0,961111111	0,972

4,1727195	0,975	0,988
4,2485872	0,974	0,989
4,3244548	0,979	0,99
4,4003224	0,983	0,991
4,47619	1,005	0,992
4,5520577	1,01	0,992

3,7131306	0,960185185	0,974
3,780642	0,966666667	0,976
3,8481535	0,989814815	0,978
3,915665	0,975925926	0,979
3,9831764	0,997222222	0,981
4,0506879	0,987962963	0,982

Anexo A5. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M0 na repetição 2..

B_250_M0 2		
VP	C/Co	Ajustados
0,068141	0	0
0,1362821	0	0
0,2044231	0	0
0,2725642	0	0,001
0,3407052	0,000595238	0,006
0,4088462	0,007571429	0,019
0,4769873	0,032142857	0,041
0,5451283	0,078571429	0,073
0,6132694	0,133333333	0,113
0,6814104	0,194047619	0,161
0,7495515	0,247619048	0,213
0,8176925	0,311904762	0,268
0,8858335	0,342857143	0,323
0,9539746	0,38452381	0,378
1,0221156	0,446428571	0,432
1,0902567	0,46547619	0,483
1,1583977	0,546428571	0,532
1,2265387	0,558333333	0,577
1,2946798	0,577380952	0,619
1,3628208	0,604761905	0,658
1,4309619	0,673809524	0,693
1,4991029	0,701190476	0,725
1,5672439	0,71547619	0,754
1,635385	0,752380952	0,781
1,703526	0,758333333	0,805
1,7716671	0,795238095	0,826
1,8398081	0,842857143	0,845
1,9079491	0,873809524	0,862
1,9760902	0,866666667	0,878
2,0442312	0,905952381	0,892
2,1123723	0,91547619	0,904
2,1805133	0,917857143	0,915

Anexo A6. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M0 na repetição 3.

B_250_M0 3		
VP	C/Co	Ajustados
0,0675275	0	0
0,135055	0	0
0,2025826	0	0,001
0,2701101	0,000488372	0,008
0,3376376	0,005046512	0,023
0,4051651	0,025581395	0,048
0,4726927	0,074418605	0,082
0,5402202	0,126744186	0,122
0,6077477	0,186046512	0,167
0,6752752	0,245348837	0,214
0,7428027	0,3	0,262
0,8103303	0,345348837	0,31
0,8778578	0,248837209	0,357
0,9453853	0,43255814	0,403
1,0129128	0,452325581	0,446
1,0804403	0,479069767	0,488
1,1479679	0,508139535	0,527
1,2154954	0,551162791	0,563
1,2830229	0,575581395	0,598
1,3505504	0,696511628	0,629
1,418078	0,645348837	0,659
1,4856055	0,652325581	0,686
1,553133	0,669767442	0,712
1,6206605	0,719767442	0,735
1,688188	0,765116279	0,757
1,7557156	0,761627907	0,776
1,8232431	0,803488372	0,795
1,8907706	0,813953488	0,812
1,9582981	0,826744186	0,827
2,0258256	0,924418605	0,841
2,0933532	0,856976744	0,854
2,1608807	0,861627907	0,866

2,2486544	0,878571429	0,924
2,3167954	0,902380952	0,933
2,3849364	0,986904762	0,941
2,4530775	0,94047619	0,947
2,5212185	0,99047619	0,953
2,5893596	1,014285714	0,959
2,6575006	0,998809524	0,964
2,7256416	1,048809524	0,968
2,7937827	1,016666667	0,971
2,8619237	1,078571429	0,975
2,9300648	1,035714286	0,978
2,9982058	1,030952381	0,98
3,0663468	1,067857143	0,983
3,1344879	0,979761905	0,985
3,2026289	1,01547619	0,986
3,27077	1,017857143	0,988
3,338911	1,061904762	0,989
3,4070521	1,060714286	0,991
3,4751931	1,023809524	0,992
3,5433341	1,071428571	0,993

2,2284082	0,886046512	0,877
2,2959357	0,870930233	0,887
2,3634633	0,945348837	0,896
2,4309908	0,881395349	0,905
2,4985183	0,934883721	0,913
2,5660458	0,926744186	0,92
2,6335733	0,960465116	0,926
2,7011009	0,95	0,932
2,7686284	0,918604651	0,938
2,8361559	0,968604651	0,943
2,9036834	0,953488372	0,948
2,971211	0,969767442	0,952
3,0387385	0,984883721	0,956
3,106266	0,946511628	0,959
3,1737935	0,930232558	0,963
3,241321	0,945348837	0,966
3,3088486	0,941860465	0,968
3,3763761	0,958139535	0,971
3,4439036	0,962790698	0,973
3,5114311	0,95	0,975
3,5789586	0,981395349	0,977
3,6464862	0,959302326	0,979
3,7140137	0,98255814	0,981
3,7815412	0,984883721	0,982
3,8490687	0,991860465	0,984
3,9165963	0,930232558	0,985
3,9841238	0,960465116	0,986
4,0516513	0,93372093	0,987

Anexo A7. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C₀) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M0 na repetição 1

B_450_M0 1		
VP	C/Co	Ajustados
0,0716829	0,000222222	0
0,1433658	0,000246914	0
0,2150487	0,000222222	0
0,2867316	0,000345679	0,001
0,3584145	0,000296296	0,007
0,4300974	0,000987654	0,018
0,5017802	0,00762963	0,039
0,5734631	0,02962963	0,069
0,645146	0,075308642	0,106

Anexo A8. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C₀) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M0 na repetição 2.

B_450_M0 2		
VP	C/Co	Ajustados
0,0684402	0,000243902	0
0,1368805	0	0
0,2053207	0,000195122	0
0,273761	0,003560976	0
0,3422012	0,01602439	0,002
0,4106414	0,040243902	0,009
0,4790817	0,065853659	0,022
0,5475219	0,053658537	0,045
0,6159622	0,140243902	0,076

0,7168289	0,137037037	0,149
0,7885118	0,216049383	0,197
0,8601947	0,27654321	0,247
0,9318776	0,344444444	0,299
1,0035605	0,387654321	0,35
1,0752434	0,425925926	0,401
1,1469263	0,449382716	0,449
1,2186092	0,509876543	0,495
1,2902921	0,555555556	0,539
1,3619749	0,575308642	0,58
1,4336578	0,609876543	0,618
1,5053407	0,654320988	0,654
1,5770236	0,654320988	0,686
1,6487065	0,688888889	0,716
1,7203894	0,703703704	0,743
1,7920723	0,772839506	0,768
1,8637552	0,748148148	0,791
1,9354381	0,733333333	0,812
2,007121	0,804938272	0,831
2,0788039	0,804938272	0,847
2,1504868	0,845679012	0,863
2,2221697	0,862962963	0,877
2,2938525	0,887654321	0,889
2,3655354	0,913580247	0,9
2,4372183	0,908641975	0,911
2,5089012	0,943209877	0,92
2,5805841	0,92962963	0,928
2,652267	0,964197531	0,935
2,7239499	0,955555556	0,942
2,7956328	0,998765432	0,948
2,8673157	0,983950617	0,953
2,9389986	1,00617284	0,958
3,0106815	1,003703704	0,962
3,0823644	1,008641975	0,966
3,1540473	1,019753086	0,97
3,2257301	1,007407407	0,973
3,297413	1,001234568	0,976
3,3690959	1,012345679	0,978
3,4407788	1,008641975	0,98
3,5124617	1,018518519	0,982
3,5841446	1,009876543	0,984

0,6844024	0,186585366	0,116
0,7528426	0,220731707	0,162
0,8212829	0,263414634	0,213
0,8897231	0,307317073	0,267
0,9581634	0,341463415	0,323
1,0266036	0,393902439	0,378
1,0950438	0,426829268	0,432
1,1634841	0,426829268	0,484
1,2319243	0,481707317	0,533
1,3003645	0,523170732	0,579
1,3688048	0,545121951	0,622
1,437245	0,568292683	0,661
1,5056853	0,657317073	0,697
1,5741255	0,664634146	0,73
1,6425657	0,698780488	0,76
1,711006	0,768292683	0,787
1,7794462	0,807317073	0,811
1,8478865	0,837804878	0,832
1,9163267	0,892682927	0,852
1,9847669	0,98902439	0,87
2,0532072	1	0,885
2,1216474	0,97804878	0,899
2,1900877	0,967073171	0,911
2,2585279	0,998780488	0,921
2,3269681	0,984146341	0,931
2,3954084	0,965853659	0,939

Anexo A9. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M0 na repetição 3.

B_450_M0 3		
VP	C/Co	Ajustados
0,0696295	0,000125	0
0,139259	0,00015	0
0,2088884	0,00015	0
0,2785179	0,001175	0
0,3481474	0,007325	0
0,4177769	0,021575	0
0,4874064	0,03875	0,001
0,5570358	0,06	0,004
0,6266653	0,095	0,012
0,6962948	0,12875	0,029
0,7659243	0,16125	0,058
0,8355538	0,19625	0,1
0,9051832	0,23125	0,155
0,9748127	0,27875	0,22
1,0444422	0,29125	0,292
1,1140717	0,34375	0,368
1,1837012	0,38125	0,445
1,2533307	0,455	0,519
1,3229601	0,475	0,588
1,3925896	0,57125	0,652
1,4622191	0,605	0,709
1,5318486	0,7375	0,759
1,6014781	0,77375	0,802
1,6711075	0,97625	0,838
1,740737	0,95125	0,869
1,8103665	0,94	0,895
1,879996	0,99875	0,916
1,9496255	0,98875	0,933
2,0192549	1,00125	0,947
2,0888844	1,01625	0,958
2,1585139	1,04875	0,967
2,2281434	1,0025	0,974
2,2977729	1,03875	0,98
2,3674023	1,04625	0,984
2,4370318	1,045	0,988

Anexo A10. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M0 na repetição 1.

T_250_M0 1		
VP	C/Co	Ajustados
0,0708074	0	0
0,1416148	0	0
0,2124221	0	0
0,2832295	0	0
0,3540369	0,000171779	0
0,4248443	0,000883436	0
0,4956517	0,005006135	0,002
0,5664591	0,015803681	0,009
0,6372664	0,03803681	0,025
0,7080738	0,084662577	0,053
0,7788812	0,144785276	0,097
0,8496886	0,2	0,154
0,920496	0,267484663	0,224
0,9913034	0,290797546	0,301
1,0621107	0,348466258	0,382
1,1329181	0,4	0,462
1,2037255	0,498159509	0,54
1,2745329	0,609815951	0,611
1,3453403	0,668711656	0,676
1,4161476	0,703067485	0,732
1,486955	0,811042945	0,781
1,5577624	0,846625767	0,823
1,6285698	0,871165644	0,858
1,6993772	0,899386503	0,887
1,7701846	0,901840491	0,91
1,8409919	0,949693252	0,929
1,9117993	1,035582822	0,944
1,9826067	0,921472393	0,957
2,0534141	0,94601227	0,966
2,1242215	0,965644172	0,974
2,1950288	1,013496933	0,98
2,2658362	1,019631902	0,985
2,3366436	0,97791411	0,988

Anexo A11. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M0 na repetição 2..

T_250_M0 2		
VP	C/Co	Ajustados
0,0717908	0	0
0,1435816	0	0
0,2153724	0,000517647	0,002
0,2871632	0,009058824	0,01
0,358954	0,035294118	0,03
0,4307448	0,075294118	0,063
0,5025356	0,135294118	0,107
0,5743264	0,192941176	0,16
0,6461172	0,237647059	0,218
0,717908	0,272941176	0,278
0,7896988	0,330588235	0,339
0,8614896	0,390588235	0,398
0,9332804	0,417647059	0,454
1,0050712	0,505882353	0,507
1,0768619	0,522352941	0,556
1,1486527	0,585882353	0,601
1,2204435	0,614117647	0,643
1,2922343	0,734117647	0,68
1,3640251	0,72	0,714
1,4358159	0,681176471	0,745
1,5076067	0,8	0,773
1,5793975	0,84	0,798
1,6511883	0,845882353	0,82
1,7229791	0,763529412	0,84
1,7947699	0,928235294	0,858
1,8665607	0,876470588	0,874
1,9383515	0,907058824	0,888
2,0101423	0,910588235	0,9
2,0819331	0,877647059	0,911
2,1537239	0,949411765	0,921
2,2255147	0,876470588	0,93
2,2973055	0,929411765	0,938
2,3690963	0,952941176	0,945
2,4408871	0,983529412	0,951
2,5126779	0,923529412	0,957
2,5844687	1,021176471	0,961
2,6562595	0,956470588	0,966
2,7280503	1,050588235	0,97
2,7998411	1,047058824	0,973
2,8716319	0,932941176	0,976

Anexo A12. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M0 na repetição 3.

T_250_M0 3		
VP	C/Co	Ajustados
0,0729788	0	0
0,1459576	0	0
0,2189363	0	0
0,2919151	0	0
0,3648939	0,000205714	0
0,4378727	0,00112	0
0,5108515	0,005325714	0,001
0,5838302	0,014514286	0,003
0,656809	0,029714286	0,009
0,7297878	0,056	0,024
0,8027666	0,08	0,05
0,8757454	0,118857143	0,09
0,9487241	0,173714286	0,144
1,0217029	0,220571429	0,21
1,0946817	0,283428571	0,285
1,1676605	0,342857143	0,364
1,2406393	0,416	0,444
1,313618	0,496	0,522
1,3865968	0,562285714	0,594
1,4595756	0,643428571	0,661
1,5325544	0,712	0,719
1,6055332	0,789714286	0,771
1,6785119	0,828571429	0,814
1,7514907	0,878857143	0,851
1,8244695	0,924571429	0,881
1,8974483	0,949714286	0,906
1,970427	0,934857143	0,926
2,0434058	0,946285714	0,942
2,1163846	0,950857143	0,955
2,1893634	0,968	0,966
2,2623422	0,978285714	0,973
2,3353209	0,977142857	0,98
2,4082997	0,964571429	0,984
2,4812785	0,968	0,988
2,5542573	0,982857143	0,991
2,6272361	0,957714286	0,993
2,7002148	0,993142857	0,995
2,7731936	0,946285714	0,996
2,8461724	0,968	0,997
2,9191512	0,988571429	0,998

2,9434227	0,974117647	0,979
3,0152135	0,918823529	0,981
3,0870042	0,943529412	0,983
3,158795	1,001176471	0,985
3,2305858	0,997647059	0,987
3,3023766	1,009411765	0,988
3,3741674	0,951764706	0,99
3,4459582	0,974117647	0,991

2,99213	1,004571429	0,998
3,0651087	0,997714286	0,999
3,1380875	1,006857143	0,999
3,2110663	0,986285714	0,999
3,2840451	0,981714286	1

Anexo A13. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M0 na repetição 1.

T_450_M0 1		
VP	C/Co	Ajustados
0,0720411	0	0
0,1440821	0	0
0,2161232	0	0
0,2881642	0,0002	0
0,3602053	0,0004	0,001
0,4322464	0,004466667	0,005
0,5042874	0,019422222	0,017
0,5763285	0,045555556	0,038
0,6483695	0,098888889	0,071
0,7204106	0,143333333	0,115
0,7924517	0,202222222	0,169
0,8644927	0,286666667	0,229
0,9365338	0,315555556	0,294
1,0085748	0,392222222	0,36
1,0806159	0,418888889	0,426
1,152657	0,493333333	0,489
1,224698	0,398888889	0,549
1,2967391	0,557777778	0,604
1,3687801	0,612222222	0,655
1,4408212	0,671111111	0,701
1,5128623	0,793333333	0,741
1,5849033	0,744444444	0,778
1,6569444	0,761111111	0,809
1,7289854	0,785555556	0,837
1,8010265	0,992222222	0,861
1,8730676	0,868888889	0,882
1,9451086	0,928888889	0,9
2,0171497	1,026666667	0,915
2,0891908	0,891111111	0,928
2,1612318	0,962222222	0,94
2,2332729	1,024444444	0,949

Anexo A14. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M0 na repetição 2.

T_450_M0 2		
VP	C/Co	Ajustados
0,0730454	0	0
0,1460908	0	0
0,2191362	0	0
0,2921816	0	0
0,365227	0,000164706	0
0,4382724	0,000517647	0
0,5113178	0,003717647	0,002
0,5843632	0,014235294	0,007
0,6574086	0,034117647	0,019
0,730454	0,067058824	0,044
0,8034994	0,108235294	0,082
0,8765447	0,154117647	0,135
0,9495901	0,214117647	0,2
1,0226355	0,270588235	0,275
1,0956809	0,343529412	0,354
1,1687263	0,405882353	0,435
1,2417717	0,468235294	0,513
1,3148171	0,564705882	0,587
1,3878625	0,645882353	0,653
1,4609079	0,770588235	0,713
1,5339533	0,788235294	0,765
1,6069987	0,82	0,809
1,6800441	0,864705882	0,846
1,7530895	0,870588235	0,877
1,8261349	0,898823529	0,902
1,8991803	0,917647059	0,923
1,9722257	0,937647059	0,94
2,0452711	0,935294118	0,953
2,1183165	0,945882353	0,963
2,1913619	0,978823529	0,972
2,2644073	0,984705882	0,978

2,3053139	1,023333333	0,957
2,377355	1	0,964
2,4493961	1,023333333	0,97
2,5214371	0,944444444	0,975

2,3374527	0,981176471	0,983
2,4104981	0,997647059	0,987
2,4835435	1,011764706	0,99
2,5565888	1,002352941	0,992

Anexo A15. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M0 na repetição 3.

T_450_M0 3		
VP	C/Co	Ajustado
0,0729542	0,000155556	0
0,1459085	0	0
0,2188627	0	0
0,2918169	0	0
0,3647712	0,000133333	0
0,4377254	0,0002	0
0,5106796	0,000644444	0
0,5836339	0,004444444	0
0,6565881	0,017422222	0,002
0,7295423	0,04	0,008
0,8024966	0,078888889	0,025
0,8754508	0,114444444	0,057
0,948405	0,158888889	0,11
1,0213593	0,203333333	0,184
1,0943135	0,257777778	0,274
1,1672677	0,341111111	0,375
1,240222	0,415555556	0,478
1,3131762	0,533333333	0,576
1,3861304	0,68	0,665
1,4590847	0,778888889	0,742
1,5320389	0,862222222	0,806
1,6049931	0,841111111	0,857
1,6779474	0,901111111	0,896
1,7509016	0,938888889	0,926
1,8238558	0,961111111	0,948
1,8968101	0,948888889	0,964
1,9697643	0,998888889	0,976
2,0427185	0,983333333	0,983
2,1156728	0,95	0,989
2,188627	1,052222222	0,993
2,2615812	1,008888889	0,995
2,3345355	1,022222222	0,997
2,4074897	1,038888889	0,998
2,4804439	1,06	0,999

Anexo A16. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M2 na repetição 1

B_250_M2 1		
VP	C/C0	Ajustado
0,065546589	0	0
0,131093178	0	0
0,196639767	0	0
0,262186356	0	0
0,327732944	0,000333333	0
0,393279533	0,003288889	0,002
0,458826122	0,012377778	0,007
0,524372711	0,031111111	0,018
0,5899193	0,065555556	0,036
0,655465889	0,104444444	0,062
0,721012478	0,146666667	0,096
0,786559067	0,188888889	0,138
0,852105656	0,232222222	0,186
0,917652245	0,275555556	0,237
0,983198833	0,313333333	0,292
1,048745422	0,357777778	0,347
1,114292011	0,387777778	0,402
1,1798386	0,437777778	0,456
1,245385189	0,506666667	0,507
1,310931778	0,494444444	0,556
1,376478367	0,542222222	0,602
1,442024956	0,571111111	0,644
1,507571545	0,615555556	0,683
1,573118133	0,66	0,718
1,638664722	0,666666667	0,751
1,704211311	0,731111111	0,78
1,7697579	0,888888889	0,806
1,835304489	0,85	0,829
1,900851078	0,857777778	0,85
1,966397667	0,906666667	0,869
2,031944256	0,89	0,885
2,097490845	1,011111111	0,9
2,163037433	0,951111111	0,912
2,228584022	0,977777778	0,924
2,294130611	1,034444444	0,933

2,3596772	1,011111111	0,942
2,425223789	0,954444444	0,95
2,490770378	0,952222222	0,956
2,556316967	1,106666667	0,962
2,621863556	0,944444444	0,967

Anexo A17. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M2 na repetição 2

B_250_M2 2		
VP	C/C0	Ajustado
0,064066541	0,000175	0
0,128133082	0	0
0,192199623	0	0
0,256266163	0	0
0,320332704	0,0015	0
0,384399245	0,001125	0,001
0,448465786	0,0054	0,004
0,512532327	0,017875	0,013
0,576598868	0,04125	0,03
0,640665408	0,08125	0,06
0,704731949	0,13875	0,101
0,76879849	0,195	0,153
0,832865031	0,2525	0,215
0,896931572	0,30875	0,283
0,960998113	0,3775	0,353
1,025064653	0,43375	0,425
1,089131194	0,4675	0,494
1,153197735	0,49	0,559
1,217264276	0,5525	0,619
1,281330817	0,655	0,674
1,345397358	0,6725	0,723
1,409463898	0,73375	0,767
1,473530439	0,7875	0,804
1,53759698	0,82375	0,837
1,601663521	0,87375	0,864
1,665730062	0,90375	0,888
1,729796603	0,92375	0,908
1,793863143	0,98875	0,924
1,857929684	0,99	0,938
1,921996225	0,99875	0,949
1,986062766	1,045	0,959
2,050129307	1,0175	0,966
2,114195848	1,0375	0,973

Anexo A18. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_250_M2 na repetição 3

B_250_M2 3		
VP	C/C0	Ajustado
0,065173321	0	0
0,130346642	0	0
0,195519963	0	0
0,260693285	0	0
0,325866606	0,000880952	0,001
0,391039927	0,006380952	0,003
0,456213248	0,021166667	0,011
0,521386569	0,04047619	0,026
0,58655989	0,072619048	0,05
0,651733211	0,111904762	0,083
0,716906533	0,158333333	0,124
0,782079854	0,192857143	0,173
0,847253175	0,242857143	0,227
0,912426496	0,291666667	0,284
0,977599817	0,338095238	0,342
1,042773138	0,416666667	0,4
1,10794646	0,448809524	0,457
1,173119781	0,505952381	0,511
1,238293102	0,535714286	0,562
1,303466423	0,572619048	0,609
1,368639744	0,60952381	0,653
1,433813065	0,680952381	0,693
1,498986386	0,679761905	0,73
1,564159708	0,729761905	0,762
1,629333029	0,766666667	0,792
1,69450635	0,802380952	0,818
1,759679671	0,835714286	0,841
1,824852992	0,945238095	0,861
1,890026313	0,889285714	0,879
1,955199634	0,941666667	0,895
2,020372956	0,908333333	0,909
2,085546277	0,936904762	0,921

2,178262388	1,0175	0,978
2,242328929	1,01875	0,982
2,30639547	1,01625	0,986
2,370462011	1,03125	0,989

2,150719598	0,988095238	0,932
2,215892919	0,988095238	0,941
2,28106624	0,95	0,949
2,346239561	0,96547619	0,956
2,411412882	0,983333333	0,962
2,476586204	1,030952381	0,967
2,541759525	1,003571429	0,972
2,606932846	0,986904762	0,976

Anexo A19. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M2 na repetição 1

B_450_M2 1		
VP	C/C0	Ajustado
0,067128018	0	0
0,134256037	0	0
0,201384055	0	0
0,268512074	0,000337349	0,001
0,335640092	0,004361446	0,004
0,402768111	0,018578313	0,014
0,469896129	0,045783133	0,033
0,537024147	0,095180723	0,062
0,604152166	0,14939759	0,102
0,671280184	0,192771084	0,151
0,738408203	0,245783133	0,205
0,805536221	0,290361446	0,263
0,87266424	0,328915663	0,324
0,939792258	0,374698795	0,383
1,006920276	0,444578313	0,442
1,074048295	0,503614458	0,497
1,141176313	0,520481928	0,55
1,208304332	0,555421687	0,599
1,27543235	0,585542169	0,643
1,342560369	0,626506024	0,684
1,409688387	0,673493976	0,721
1,476816405	0,704819277	0,754
1,543944424	0,708433735	0,784
1,611072442	0,806024096	0,81
1,678200461	0,865060241	0,835
1,745328479	0,871084337	0,856
1,812456498	0,939759036	0,874
1,879584516	0,93373494	0,89
1,946712534	0,965060241	0,904
2,013840553	0,946987952	0,917
2,080968571	1	0,928

Anexo A20. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M2 na repetição 2.

B_450_M2 2		
VP	C/C0	Ajustado
0,067508798	0	0
0,135017596	0	0
0,202526394	0	0
0,270035192	0	0
0,33754399	9,41176E-05	0
0,405052787	0,000635294	0
0,472561585	0,005176471	0,002
0,540070383	0,019058824	0,008
0,607579181	0,044705882	0,021
0,675087979	0,081176471	0,046
0,742596777	0,127058824	0,083
0,810105575	0,177647059	0,134
0,877614373	0,222352941	0,196
0,945123171	0,269411765	0,266
1,012631969	0,324705882	0,341
1,080140766	0,382352941	0,417
1,147649564	0,481176471	0,492
1,215158362	0,52	0,562
1,28266716	0,56	0,627
1,350175958	0,641176471	0,686
1,417684756	0,742352941	0,738
1,485193554	0,816470588	0,783
1,552702352	0,86	0,821
1,62021115	0,897647059	0,854
1,687719948	0,938823529	0,882
1,755228746	0,957647059	0,904
1,822737543	0,928235294	0,923
1,890246341	0,981176471	0,939
1,957755139	0,931764706	0,951
2,025263937	0,981176471	0,961
2,092772735	0,965882353	0,969

2,14809659	0,990361446	0,937
2,215224608	1,003614458	0,945
2,282352627	0,986746988	0,953
2,349480645	0,938554217	0,959
2,416608663	0,944578313	0,964
2,483736682	1,004819277	0,969
2,5508647	0,981927711	0,973
2,617992719	0,998795181	0,977
2,685120737	0,980722892	0,98

2,160281533	0,949411765	0,976
2,227790331	0,969411765	0,981
2,295299129	0,98	0,985
2,362807927	0,985882353	0,988
2,430316725	0,947058824	0,991
2,497825523	0,968235294	0,993
2,56533432	0,936470588	0,994
2,632843118	0,941176471	0,996
2,700351916	0,961176471	0,997

Anexo A21. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento B_450_M2 na repetição 3.

B_450_M2 3		
VP	C/C0	Ajustado
0,067441594	0	0
0,134883188	0	0
0,202324782	0	0
0,269766376	0,000170316	0
0,33720797	0,002092457	0
0,404649564	0,0113382	0,001
0,472091158	0,030413625	0,005
0,539532752	0,052311436	0,014
0,606974346	0,090024331	0,031
0,67441594	0,136253041	0,058
0,741857534	0,170316302	0,096
0,809299128	0,218978102	0,144
0,876740722	0,250608273	0,2
0,944182316	0,277372263	0,262
1,01162391	0,317518248	0,326
1,079065504	0,355231144	0,392
1,146507098	0,397810219	0,456
1,213948692	0,49026764	0,518
1,281390286	0,523114355	0,576
1,34883188	0,559610706	0,629
1,416273474	0,624087591	0,678
1,483715067	0,661800487	0,722
1,551156661	0,708029197	0,761
1,618598255	0,778588808	0,796
1,686039849	0,852798054	0,826
1,753481443	0,925790754	0,853
1,820923037	0,959854015	0,875
1,888364631	1,003649635	0,895
1,955806225	0,948905109	0,912
2,023247819	0,986618005	0,926

Anexo A22. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M2 na repetição 1

T_250_M2 1		
VP	C/C0	Ajustado
0,071391094	0	0
0,142782187	0	0
0,214173281	0	0
0,285564374	0	0
0,356955468	0,000243902	0
0,428346561	0,002512195	0
0,499737655	0,009560976	0
0,571128748	0,023365854	0,001
0,642519842	0,03902439	0,003
0,713910935	0,065853659	0,01
0,785302029	0,090243902	0,027
0,856693123	0,131707317	0,058
0,928084216	0,163414634	0,106
0,99947531	0,2	0,171
1,070866403	0,224390244	0,249
1,142257497	0,28902439	0,337
1,21364859	0,385365854	0,428
1,285039684	0,470731707	0,518
1,356430777	0,602439024	0,602
1,427821871	0,675609756	0,678
1,499212964	0,747560976	0,744
1,570604058	0,806097561	0,799
1,641995151	0,874390244	0,845
1,713386245	0,929268293	0,882
1,784773339	0,967073171	0,911
1,856168432	0,931707317	0,934
1,927559526	0,968292683	0,951
1,998950619	0,963414634	0,965
2,070341713	0,976829268	0,974
2,141732806	0,969512195	0,982

2,090689413	0,9513382	0,938
2,158131007	0,962287105	0,948
2,225572601	0,9756691	0,957
2,293014195	1,0486618	0,964
2,360455789	1,03892944	0,97

2,2131239	0,995121951	0,987
2,284514993	0,997560976	0,991
2,355906087	0,962195122	0,993
2,42729718	0,97195122	0,995
2,498688274	0,945121951	0,997

Anexo A23. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M2 na repetição 2.

T_250_M2 2		
VP	C/C0	Ajustado
0,07095697	0,000146341	0
0,141913939	0,000146341	0
0,212870909	0,000146341	0
0,283827879	0,000170732	0
0,354784849	0,000243902	0
0,425741818	0,001853659	0
0,496698788	0,011463415	0,002
0,567655758	0,030487805	0,007
0,638612727	0,068292683	0,018
0,709569697	0,102439024	0,039
0,780526667	0,134146341	0,071
0,851483637	0,18902439	0,114
0,922440606	0,201219512	0,168
0,993397576	0,232926829	0,229
1,064354546	0,280487805	0,296
1,135311515	0,319512195	0,366
1,206268485	0,375609756	0,435
1,277225455	0,440243902	0,503
1,348182425	0,519512195	0,566
1,419139394	0,615853659	0,625
1,490096364	0,708536585	0,679
1,561053334	0,719512195	0,727
1,632010303	0,804878049	0,769
1,702967273	0,780487805	0,806
1,773924243	0,913414634	0,838
1,844881212	0,897560976	0,865
1,915838182	0,924390244	0,888
1,986795152	0,93902439	0,908
2,057752122	0,954878049	0,924
2,128709091	0,954878049	0,938
2,199666061	0,940243902	0,949
2,270623031	0,965853659	0,959
2,34158	0,970731707	0,967
2,41253697	0,97195122	0,973
2,48349394	0,976829268	0,978

Anexo A24. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_250_M2 na repetição 3.

T_250_M3 3		
VP	C/C0	Ajustado
0,071378274	0	0
0,142756548	0,000102564	0
0,214134822	0,001538462	0
0,285513096	0,000871795	0
0,35689137	0,000974359	0
0,428269644	0,001358974	0
0,499647918	0,005794872	0,002
0,571026192	0,019923077	0,007
0,642404466	0,042307692	0,02
0,71378274	0,087179487	0,044
0,785161014	0,130769231	0,083
0,856539288	0,178205128	0,135
0,927917562	0,226923077	0,199
0,999295836	0,283333333	0,273
1,07067411	0,346153846	0,351
1,142052384	0,396153846	0,431
1,213430658	0,474358974	0,508
1,284808932	0,537179487	0,581
1,356187206	0,620512821	0,647
1,42756548	0,684615385	0,706
1,498943754	0,733333333	0,758
1,570322028	0,783333333	0,803
1,641700302	0,858974359	0,84
1,713078576	0,921794872	0,872
1,78445685	0,928205128	0,897
1,855835124	0,962820513	0,919
1,927213398	0,956410256	0,936
1,998591672	0,998717949	0,95
2,069969946	0,991025641	0,961
2,14134822	0,996153846	0,969
2,212726494	0,992307692	0,976
2,284104768	0,994871795	0,982
2,355483042	1	0,986
2,426861316	0,992307692	0,989

2,55445091	0,953658537	0,982
2,625407879	0,956097561	0,986
2,696364849	0,963414634	0,989
2,767321819	0,970731707	0,991
2,838278788	0,957317073	0,993

2,49823959	0,992307692	0,992
------------	-------------	-------

Anexo A25. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M2 na repetição 1

T 450_M2 1		
VP	C/C0	Ajustado
0,071530679	0,000216867	0
0,143061357	0	0
0,214592036	0,00026506	0,001
0,286122715	0,004216867	0,005
0,357653393	0,022361446	0,017
0,429184072	0,04939759	0,038
0,500714751	0,097590361	0,069
0,57224543	0,153012048	0,106
0,643776108	0,203614458	0,15
0,715306787	0,272289157	0,197
0,786837466	0,313253012	0,246
0,858368144	0,339759036	0,295
0,929898823	0,373493976	0,344
1,001429502	0,4	0,392
1,07296018	0,436144578	0,437
1,144490859	0,465060241	0,481
1,216021538	0,477108434	0,522
1,287552217	0,506024096	0,561
1,359082895	0,53253012	0,597
1,430613574	0,568674699	0,63
1,502144253	0,585542169	0,661
1,573674931	0,622891566	0,69
1,64520561	0,639759036	0,717
1,716736289	0,689156627	0,741
1,788266967	0,702409639	0,763
1,859797646	0,720481928	0,784
1,931328325	0,773493976	0,803
2,002859004	0,824096386	0,82
2,074389682	0,83373494	0,836
2,145920361	0,857831325	0,85
2,21745104	0,877108434	0,863
2,288981718	0,909638554	0,875
2,360512397	0,926506024	0,886
2,432043076	0,965060241	0,896

Anexo A26. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M2 na repetição 2.

T 450_M2 2		
VP	C/C0	Ajustado
0,070799815	0	0
0,14159963	0	0
0,212399446	0,000408163	0
0,283199261	0,007193878	0,003
0,353999076	0,024234694	0,012
0,424798891	0,052295918	0,031
0,495598706	0,096938776	0,059
0,566398522	0,135204082	0,097
0,637198337	0,182397959	0,142
0,707998152	0,18494898	0,192
0,778797967	0,266581633	0,245
0,849597782	0,31122449	0,299
0,920397597	0,349489796	0,353
0,991197413	0,401785714	0,406
1,061997228	0,43877551	0,456
1,132797043	0,491071429	0,504
1,203596858	0,522959184	0,548
1,274396673	0,55994898	0,59
1,345196489	0,602040816	0,629
1,415996304	0,647959184	0,664
1,486796119	0,6875	0,697
1,557595934	0,696428571	0,727
1,628395749	0,733418367	0,754
1,699195565	0,776785714	0,779
1,76999538	0,789540816	0,801
1,840795195	0,839285714	0,821
1,91159501	0,864795918	0,839
1,982394825	0,871173469	0,856
2,053194641	0,87755102	0,871
2,123994456	0,87755102	0,884
2,194794271	0,917091837	0,896
2,265594086	0,928571429	0,907
2,336393901	0,890306122	0,916
2,407193716	0,941326531	0,925

2,503573754	0,961445783	0,905	2,477993532	0,952806122	0,933
2,575104433	0,965060241	0,914	2,548793347	0,950255102	0,94
2,646635112	1,021686747	0,921	2,619593162	0,974489796	0,946
2,718165791	1,007228916	0,928	2,690392977	0,975765306	0,952
2,789696469	1,015662651	0,935	2,761192792	1,019132653	0,957
2,861227148	1,008433735	0,94	2,831992608	0,993622449	0,961
2,932757827	1,001204819	0,946	2,902792423	0,980867347	0,965
3,004288505	1,028915663	0,95	2,973592238	0,992346939	0,969
3,075819184	1,010843373	0,955	3,044392053	0,987244898	0,972
3,147349863	1,046987952	0,959	3,115191868	0,992346939	0,975
3,218880541	1,025301205	0,962	3,185991684	0,961734694	0,978

Anexo A27. Valores do volume de poros (VP) e concentrações relativas (C/C0) do íon potássio obtidas experimentalmente e ajustadas pelo modelo STANMOD para o tratamento T_450_M2 na repetição 3.

T 450_M2 3		
VP	C/C0	Ajustado
0,071060545	0	0
0,14212109	0	0
0,213181635	0	0
0,28424218	0,000925	0,002
0,355302725	0,0225	0,01
0,42636327	0,02875	0,026
0,497423815	0,07375	0,054
0,56848436	0,1225	0,092
0,639544905	0,18	0,138
0,71060545	0,235	0,191
0,781665995	0,285	0,248
0,85272654	0,32875	0,306
0,923787085	0,37125	0,364
0,99484763	0,42625	0,421
1,065908176	0,4825	0,475
1,136968721	0,5	0,527
1,208029266	0,55625	0,574
1,279089811	0,58125	0,618
1,350150356	0,61	0,659
1,421210901	0,63875	0,696
1,492271446	0,6625	0,729
1,563331991	0,6875	0,759
1,634392536	0,73625	0,786
1,705453081	0,7725	0,811
1,776513626	0,79	0,832
1,847574171	0,845	0,852
1,918634716	0,87	0,869
1,989695261	0,93625	0,884

2,060755806	0,96125	0,898
2,131816351	0,98625	0,91
2,202876896	1,005	0,92
2,273937441	0,995	0,93
2,344997986	1,0025	0,938
2,416058531	1,01875	0,946
2,487119076	1,0075	0,952
2,558179621	1,00875	0,958
2,629240166	0,98625	0,963
2,700300711	0,98125	0,967
2,771361256	1,035	0,971
2,842421801	0,99625	0,975