UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA- UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SILÍCIO E POTÁSSIO NO CULTIVO DO FEIJÃO MODULA A TAXA DE DECOMPOSIÇÃO E DE LIBERAÇÃO DE MACRONUTRIENTES DOS RESTOS CULTURAIS

Paulo Sergio Rodrigues de Lima
Engenheiro Agrônomo

2024

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

SILÍCIO E POTÁSSIO NO CULTIVO DO FEIJÃO MODULA A TAXA DE DECOMPOSIÇÃO E DE LIBERAÇÃO DE MACRONUTRIENTES DOS RESTOS CULTURAIS

Paulo Sergio Rodrigues de Lima
Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado
Coorentadora: Dra. Kamilla Silva Oliveira

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)

2024

L732s

Lima, Paulo Sergio Rodrigues de
Silício e potássio no cultivo do feijão modula a taxa de decomposição e de liberação de macronutrientes dos restos culturais / Paulo Sergio Rodrigues de Lima. -- Jaboticabal, 2024
50 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Renato de Mello Prado
Coorientadora: Kamilla Silva Oliveira

1. Resíduo vegetal. 2. Fabaceae. 3. Fertilidade do solo. 4. Plantio direto. 5. Phaseolus vulgaris L.. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Os resultados desta pesquisa indicam o impacto de práticas de manejo de plantas e de solos que está alinhado aos objetivos 2 (Fome zero e agricultura sustentável) e 12 (Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis) presente nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente em agroecosistemas que utilizam o sistema de plantio direto. Ficou evidenciado que o uso de doses de Si na fertirrigação em conjunto com adubação potássica favorece o cultivo sustentável do feijão pois desempenha um papel relevante mantendo-se a palhada rica em Si no campo e promove a proteção do solo por mais tempo, além de liberar mais nutrientes para a cultura em sucessão. Estes benefícios além de promoverem melhoria na física e química do solo, podem trazer benefícios financeiros pois, possibilitam aos agricultores melhor manejo da adubação, podendo auxiliar na redução de custos com fertilizantes, em resposta aos benefícios da decomposição dos restos culturais e aumento da liberação de macronutrientes, contribuindo para a viabilidade agro-econômica. Os achados dessa pesquisa possuem potencial para a implementação, auxiliando no uso de práticas ambientalmente corretas de manejo de plantas e do solo.

Potential impact of this research

The results of this research indicate the impact of plant and soil management practices that are aligned with objectives 2 (Zero hunger and sustainable agriculture) and 12 (Ensure sustainable production and consumption patterns) present in the Sustainable Development Goals (SDGs), mainly in agroecosystems that use the direct planting system. It was evident that the use of Si doses in fertigation in conjunction with potassium fertilization favors the sustainable cultivation of beans as it plays an important role in maintaining Si-rich straw in the field and promotes soil protection for longer, in addition to releasing more nutrients for the succession crop. These benefits, in addition to promoting improvements in soil physics and chemistry, can bring financial benefits as they enable farmers to better manage fertilization, and can help reduce fertilizer costs, in response to the benefits of decomposing crop residues and increasing the release of macronutrients, contributing to agro-economic viability. The findings of this research have potential for implementation, assisting in the use of environmentally correct plant and soil management practices.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SILÍCIO E POTÁSSIO NO CULTIVO DO FEIJÃO MODULA A TAXA DE DECOMPOSIÇÃO E DE LIBERAÇÃO DE MACRONUTRIENTES DOS RESTOS CULTURAIS

AUTOR: PAULO SERGIO RODRIGUES DE LIMA
ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO
COORIENTADORA: KAMILLA SILVA OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
RENATO DE MELLO PRADO
Data: 22/04/2024 18:48:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciencias da Producao Agricola / FCAV UNESP Jaboticabal

gov.br Documento assinado digitalmente
CID NAUDI SILVA CAMPOS
Data: 23/04/2024 10:59:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. CID NAUDI SILVA CAMPOS (Participaçao Virtual)
Departamento de Agronomia / Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) - Chapadão do Sul/MS

Prof. Dr. GUSTAVO CAIONE (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciências Biológicas e Agrárias / Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) - Alta Floresta/MT

gov.br Documento assinado digitalmente
GUSTAVO CAIONE
Data: 23/04/2024 10:30:01-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Jaboticabal, 22 de abril de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PAULO SERGIO RODRIGUES DE LIMA, natural do município de Capitão Poço no Estado do Pará, nascido em 07 de janeiro de 1991, filho de agricultores Manoel Gomes de Lima e Francisca Rodrigues de Lima. Ingressou na Universidade Federal Rural da Amazônia, campus de Capitão Poço, em 2015 no curso de graduação em Agronomia, concluindo em 2021. Participou de projeto Núcleo de Estudos, Pesquisas e Extensão em Agricultura Familiar e Agroecologia, da Universidade Federal Rural da Amazônia, campus Capitão Poço, durante o ano de 2017. Participou também durante a graduação na condição de voluntário, durante o ano de 2017, no campus da referida universidade de projetos e atividades na área de produção vegetal, com atividades realizadas em maior parte no campo (experimentos) e algumas em laboratório. Participou de estágio ainda na graduação, em empresa privada, na produção de mudas de laranja, e no packing house da fazenda Lima no município de Capitão Poço, durante os meses de abril a maio de 2019. O que permitiu ampliar os conhecimentos técnicos sobre produção de mudas de laranja e lavagem e classificação de frutas de laranja no packing house para comercialização. Ingressou na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus de Jaboticabal, em julho de 2022, onde realizou o curso de mestrado, pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia Ciência do Solo. Durante o mestrado, no mês de outubro de 2023, ministrou aulas nas turmas de graduação em Agronomia, pelo estágio de docência, ofertado pela referida faculdade, sob orientação do Professor Dr. Renato de Mello Prado. Em janeiro de 2024, participou de banca de Trabalho de Conclusão de Curso, TCC. Atualmente é membro do Grupo de Estudos em Nutrição de Plantas (Genplant) da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP coordenado pelo Professor Dr. Renato de Mello Prado.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”

Josué 1:9

A Deus, pela oportunidade concedida e o dom da vida e sabedoria. Aos meus avós paternos, Izabel Batista de Lima e Valdemar Gomes de Lima, pelos ensinamentos de bons princípios morais e valores cristãos. Aos meus familiares pela motivação e dedicação, durante as minhas jornadas em direção aos meus objetivos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade a mim concedida, sem Ele não teria alcançado nenhuma conquista em minha vida, as batalhas e dificuldades são árduas, mais o Senhor Deus me fará vencedor.

Agradeço a minha família por sempre ter confiado e me apoiado, mesmo diante das dificuldades, mais nunca perderam a confiança em mim, de modo especial meus pais/avós Izabel Batista de Lima e Valdemar Gomes de Lima, meus tios Miguel Gomes de Lima e Raimundo Gomes de Lima e minha prima Maria Bruna de Lima Oliveira, vocês sempre estiveram presentes em vários acontecimentos em minha vida, aos meus pais Manoel Gomes de Lima e Francisca Rodrigues de Lima, aos meus irmãos Antônio Maria Rodrigues de Lima e Maria Marcilene Rodrigues de Lima.

Muito obrigado a cada um da minha família de modo geral, pois sei que vocês têm confiança e respeito para com a minha pessoa e sempre me apoiaram nas minhas decisões.

Agradeço também ao Professor Dr. Renato de Mello Prado, por ter aceitado ser meu orientador e pelos ensinamentos, tive dificuldades ao longo dessa caminhada, mais com suas orientações consegui vencer. Muito obrigado professor por toda a dedicação.

Agradeço a minha coorientadora a Drª Kamilla Silva Oliveira por toda dedicação e ensinamentos passados, você foi essencial para que eu pudesse conduzir e concluir a pesquisa, agradeço a sua compreensão nos vários momentos que tive dificuldades e você sempre procurando me ajudar e deixar a caminhada menos “penosa”, posso dizer, que você foi um braço forte nessa caminhada. Muito obrigado como costumo chamar, professora Kamilla.

Agradecer também ao Genplant e a cada um dos membros, em especial o Carlos de Araraquara como eu o costumava chamar, pelas suas contribuições em experimento em campo e análises no laboratório e ao Milton Costa, por sempre ter me ajudado em vários momentos quando solicitei seu auxílio, seja em campo, laboratório e até mesmo nas literaturas.

Agradeço a Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, campus de Jaboticabal, por toda estrutura para que pudesse realizar as demandas da pós-graduação e ao Departamento de Solos e Adubos e seus funcionários. Para mim, foi uma experiência muito grande, vir de outro estado, Pará e poder estudar numa instituição de referência no país. Agradeço a cada contribuição e colaboração de cada um, seja de forma direta ou indireta, muito obrigado a todos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Muito obrigado.

SUMÁRIO

Página

RESUMO ii
ABSTRACT iii
LISTA DE FIGURAS iv
1 INTRODUÇÃO 1
2 REVISÃO DE LITERATURA 3
2.1 Silício e potássio na nutrição de plantas 3
2.2 Implicações gerais sobre a decomposição de restos culturais 6
2.3 Relação silício e potássio na decomposição e liberação de nutrientes dos restos culturais 8
3 MATERIAL E MÉTODOS 10
3.1 Condições de cultivo da planta origem 10
3.2 Tratamentos e delineamento experimental 11
3.3 Condições experimentais em campo 11
3.4 Variáveis analisadas 12
3.4.1 Quantidade de Si, N, C e P 12
3.4.2 Massa seca da palhada 12
3.4.3 Taxa de decomposição 12
3.4.4 Taxa de liberação de nutrientes 13
3.5 Formas de análise dos resultados 13
4 RESULTADOS 14
4.1 Experimento 1 14
4.2 Experimento 2 18
5 DISCUSSÃO 21
6 CONCLUSÕES 25
7 REFERÊNCIAS 26
APÊNDICE 35
Apêndice A 36

SILÍCIO E POTÁSSIO NO CULTIVO DO FEIJÃO MODULA A TAXA DE DECOMPOSIÇÃO E DE LIBERAÇÃO DE MACRONUTRIENTES DOS RESTOS CULTURAIS

RESUMO - A nutrição silicatada e potássica no cultivo do feijão pode modular a decomposição e a liberação do silício e dos nutrientes dos restos culturais e isso precisa ser melhor compreendido. Objetivou-se avaliar a taxa de liberação de nutrientes durante 120 dias de decomposição da palhada provinda de plantas de feijão cultivadas com e sem adubação potássica. Os tratamentos consistiram em esquema fatorial 4x5 com quatro doses de Si iguais a 0; 4; 8 e 12 kg ha^{-1} avaliadas em cinco tempos de decomposição da palhada de plantas de feijão aos 0; 30; 60; 90; e 120 dias após a colheita, dispostos em blocos casualizados com quatro repetições. Estes tratamentos foram estudados em palhada da cultura do feijão submetidas a adubação potássica (experimento 1) e na ausência da adubação potássica (experimento 2). Foram analisadas o acúmulo inicial de Si, C, N e P, massa seca, taxa de decomposição e taxa de liberação de macronutrientes da palhada no tempo. O uso do Si via fertirrigação em conjunto com adubação potássica (K) no feijoeiro, modula as taxas de decomposição da leguminosa. Nas parcelas fertilizadas com potássio e uso do Si, houve redução da taxa de decomposição na fase inicial até 60 dias, ocorrendo efeitos não significativo após esse período. Na palhada sem adubação potássica o efeito do Si incrementou essa taxa de decomposição nas fases finais do experimento aos 90 e 120 dias de avaliação dos restos culturais. A liberação de Si é alta em períodos iniciais de decomposição em ambas as condições de K. A adubação com Si amplia a liberação dos macronutrientes da palhada de feijão em ambas as condições potássicas nas doses 4 e 8 kg ha^{-1} até 60 dias sendo estratégia promissora para aumentar a liberação de nutrientes no solo.

Palavras-chave: resíduo vegetal, Fabaceae, fertilidade do solo, plantio direto, *Phaseolus vulgaris* L.

SILICON AND POTASSIUM IN BEAN CULTIVATION MODULATES THE RATE OF DECOMPOSITION AND RELEASE OF MACRONUTRIENTS FROM CROP REMAINS

ABSTRACT - Silicate and potassium nutrition in bean cultivation can modulate the decomposition and release of silicon and nutrients from crop residues and this needs to be better understood. The objective was to evaluate the nutrient release rate during 120 days of straw decomposition from bean plants cultivated with and without potassium fertilization. The treatments consisted of a 4x5 factorial scheme with four doses of Si equal to 0; 4; 8 and 12 kg ha-1 evaluated at five times of decomposition of bean plant straw at 0; 30; 60; 90; and 120 days after harvest, arranged in randomized blocks with four replications. These treatments were studied on bean crop straw subjected to potassium fertilization (experiment 1) and in the absence of potassium fertilization (experiment 2). The initial accumulation of Si, C, N and P, dry mass, decomposition rate and macronutrient release rate from straw over time were analyzed. The use of Si via fertigation in conjunction with potassium (K) fertilization in bean plants modulates the decomposition rates of the legume. In plots fertilized with potassium and the use of Si, there was a reduction in the decomposition rate in the initial phase up to 60 days, with non-significant effects occurring after this period. In straw without potassium fertilization, the effect of Si increased this decomposition rate in the final phases of the experiment at 90 and 120 days of evaluation of crop residues. The release of Si is high in initial periods of decomposition in both K conditions. Fertilization with Si increases the release of macronutrients from bean straw in both potassium conditions at doses 4 and 8 kg ha-1 up to 60 days, being a strategy promising to increase the release of nutrients into the soil.

Keywords: plant residue, Fabaceae, soil fertility, direct planting, *Phaseolus vulgaris* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Temperatura mínima e máxima do ar, e precipitação durante o período experimental. 12
Figura 2. Massa seca e taxa de decomposição, respectivamente, da palhada de plantas de feijão que receberam adubação potássica (a, b) e doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. 14
Figura 3. Taxa de liberação de Si (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), S (g) e C (h) da palhada de plantas de feijão, que receberam adubação potássica e doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}.. 17
Figura 4. Massa seca e taxa de decomposição, respectivamente, da palhada de plantas de feijão que não receberam adubação potássica (a, b) e receberam doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}.. 18
Figura 5. Taxa de liberação de Si (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), S (g) e C (h) da palhada de plantas de feijão que não receberam adubação potássica e receberam doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. 20

1 INTRODUÇÃO

A cultura do feijão após a colheita dos grãos deixa na área os restos culturais que têm muitos benefícios para o solo e para o cultivo subsequente fortalecendo a sustentabilidade da agricultura tropical. O retorno da palha ao solo após a colheita tem sido amplamente recomendado como uma prática ambientalmente correta para gerir o sequestro de carbono (C) (Li et al*.,* 2014) e proteção ao solo e melhoria da produção de grãos (Carvalho et al*.,* 2013*;* Li et al., 2018; Bai et al., 2021), pois ela pode complementar os nutrientes disponíveis no solo e fornecer um suprimento a longo prazo para o crescimento das culturas (Liu et al., 2014).

A composição nutricional associada às condições climáticas (Yang et al., 2021; Zhang et al., 2018; Wang et al., 2021) influenciam a atividade dos microorganismos decompositores (Hishinuma et al., 2017) afetando o tempo de permanência da palhada no campo e tempo gasto para a liberação de nutrientes. Inicialmente ocorre a degradação de compostos ricos em nitrogênio (N) e fósforo (P), seguida por hemicelulose e celulose, e ao final, compostos ricos em carbono (C) como a lignina (Pei et al., 2010). Neste sentido, alterações na composição do material podem influenciar a taxa de decomposição e liberação de nutrientes no tempo para todas as espécies em condições ambientais favoráveis ao crescimento. Contudo, leguminosas possuem maior conteúdo de N e menor conteúdo de C em seus tecidos em relação às gramíneas e, portanto, possuem decomposição mais rápida (Virk et al., 2022) e baixo poder de cobertura do solo e enriquecimento em matéria orgânica, principalmente em climas tropicais que possuem alta temperatura e pluviosidade anual. Este fator limita o aproveitamento da liberação de nutrientes para a próxima cultura, sendo um gargalo enfrentado em países com estas condições ambientais.

Deste modo, uma nutrição balanceada da planta afeta a composição nutricional, podendo influenciar diretamente a decomposição e liberação nutrientes. Um desses nutrientes é o potássio (K), pois contribui na manutenção do ajuste osmótico, da abertura e fechamento dos estômatos e atividade enzimática (da Silva et al., 2021) em condições ideais. Além disso, ele melhora a assimilação líquida de C, o transporte de açúcares no floema (Ibrahim et al., 2020), e modificações no seu fornecimento às plantas afetam a composição nutricional (Costa et al., 2023 a, b).

Associado a isso, o uso de elementos benéficos, como o silício (Si) é indicado em muitos estudos como atenuador dos danos causados por diversos estresses (de Mello Prado, 2021) inclusive deficiência de K visto em plantas de milho e de feijão (Costa et al., 2023 a, b; dos Santos Sarah et al., 2021) e mesmo em condições sem estresse (Hao et al., 2020; Lata-Tenesaca et al., 2021; de Carvalho et al., 2022). Estudos indicam que a presença de Si afeta o conteúdo de C da biomassa vegetal além de influenciar os teores de N, P e outros nutrientes e pode ter forte impacto na renovação de nutrientes para o solo (Schaller e Struyf, 2013) ampliando a liberação de nutrientes do material como relatados em estudos anteriores (Marxen et al., 2016). É possível que devido ao papel do K no transporte de carboidratos na planta, das folhas para outros órgãos, estes compostos possam ser utilizados para síntese de compostos estruturais como celulose (Prado, 2021). Isso pode uniformizar compostos estruturais nos diferentes órgãos da planta e ter reflexos em possível diminuição da decomposição. Contudo, estes estudos não avaliaram as condições de K e este efeito em uma leguminosa que possui baixa absorção de Si (dos Santos Sarah et al., 2021). Além disso, faltam informações de como este enriquecimento com Si afeta a decomposição e a liberação de nutrientes, principalmente em plantas que naturalmente apresentam decomposição acelerada devido à baixa relação C/N (Lynch et al., 2016; Virk et al., 2022) e em condições de clima tropical como do Brasil.

É possível que o material vegetal enriquecido com Si possa apresentar menor taxa de decomposição pois ao aumentar compostos recalcitrantes com C dificulta a redução de massa, podendo ser estratégia para manejar a palhada de plantas leguminosas (Schaller et al., 2012). No entanto, esse tema ainda não está consolidado pois existem indicações que o uso do Si ao estar associado aos componentes da parede celular pode induzir a planta a diminuir a síntese de compostos estruturais que tem alto custo energético (Raven, 1983) e isso poderia ter implicações na decomposição da palhada.

Uma das estratégias pode ser o uso de Si e do K com o objetivo de modular conciliando decomposição da palhada e a taxa de liberação de nutrientes do resíduo vegetal, reduzir o uso de fertilizante para a próxima cultura e aumentar a eficiência do processo de ciclagem de nutrientes. Em um sistema de sucessão de culturas onde ocorre a colheita e em seguida de uma nova semeadura, os restos culturais do feijão

poderiam ter um efeito imediato nesta cultura que geralmente tem ciclo próximo de 120 dias para cultivos anuais. No cultivo subsequente a palhada residual do feijão é primordial que permaneça com baixa taxa de decomposição especialmente para colaborar com manutenção da cobertura morta na superfície do solo. Isso ocorre porque nesta fase inicial durante até 30 ou até 60 dias após a semeadura dependendo da espécie a cultura subsequente ainda não tem área foliar suficiente para contribuir com a proteção do solo. Portanto, é relevante que o papel do Si para diminuir a decomposição da palhada especialmente na fase inicial da decomposição.

Com base no exposto, hipotetizamos neste estudo que: (i) espera-se que o Si modifique os padrões de decomposição da palhada de feijão ao longo do tempo, com uma resposta que é influenciada pela presença e condição de adubação potássica, e (ii) que a presença de Si aumenta a liberação de macronutrientes, como P, K, Ca, Mg e S, em ambas as condições de adubação potássica, particularmente nas primeiras fases de decomposição.

Deste modo, o objetivo deste estudo foi avaliar a taxa de decomposição e liberação de nutrientes da palhada durante 120 dias de decomposição provinda de plantas de feijão e doses de Si com e sem adubação potássica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Silício e potássio na nutrição de plantas

Os nutrientes presentes no solo e disponíveis às plantas, são fundamentais em diversos aspectos como o crescimento, processos fisiológicos e metabólicos. E são constituintes nutricionais das plantas, estando intimamente relacionados ao seu crescimento e desenvolvimento (Khan et al., 2023). Esses nutrientes são classificados em macronutrientes, por serem exigidos pelas plantas em quantidades maiores que 1000 mg kg e em micronutrientes, que são absorvidos em quantidades menores que 100 mg kg (Temiz et al., 2017).

O K é um dos macronutrientes mais absorvidos pelas plantas, por ser requerido em grandes quantidades assim como os nutrientes nitrogênio e fósforo, além disso, está presente em quantidades elevadas nos tecidos fotossintéticos das plantas, ficando atrás do N (Soumare et al., 2023). Após absorção pelas raízes das plantas, o

K pode ser retido no vacúolo ou ser transportado pelo xilema, até a parte aérea, onde será redistribuído pelo floema aos tecidos vegetais (Mostofa et al., 2022). O transporte de K do solo até os tecidos das plantas é realizado por transportadores específicos de K que são os canais de cátions não seletivos e transportadores de alta afinidade de potássio (Nieves-Cordones et al., 2014; Ragel et al., 2019).

O K possui diversas funções nas plantas como ativação de mais de 60 enzimas, controle do potencial osmótico das células, neutralização de moléculas aniônicas solúveis e insolúveis e estabilização do pH celular (Prado, 2021), abertura e fechamento dos estômatos, possibilitando assim, o controle do fluxo de gases e da água melhorando e eficiência de uso de água das plantas (Sardans e Peñuelas, 2021). O K ainda pode induzir melhores respostas dos sistemas antioxidantes das plantas e reduzir a formação de espécies reativas de oxigênio, principalmente ligadas a fotossíntese durante estresses (Johnson et al., 2022).

Existem ainda, elementos que não são essenciais às plantas, mas, o seu fornecimento induz respostas positivas e contribui para um aumento da biomassa e rendimento das culturas e são conhecidos como elementos benéficos (Singhal et al., 2023). O Si é considerado elemento benéfico às plantas e seu fornecimento induz resistência aos estresses bióticos e abióticos, além de contribuir para absorção de vários nutrientes (Temiz et al., 2017).

O Si é o segundo elemento em abundância presente em 27,7% da crosta terrestre é constituinte de rochas, areia e argila (Dechen e Nachtigall, 2007). Porém em solos tropicais, onde o processo de intemperismo é intenso, ocorre uma baixa disponibilidade desse elemento às plantas (Pereira et al., 2003), o que pode reduzir seus efeitos benéficos, principalmente em plantas que não possuem transportadores eficientes de Si. O Si é absorvido na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) de forma ativa, passiva ou exclusora (Debona et al., 2017), e seu transporte ocorre pelo xilema, onde concentra-se na epiderme das folhas e colmos em forma de uma dupla camada de sílica, reduzindo a redistribuição a outros órgãos (Camargo, 2016). No solo, o ácido monossilícico, apresenta variação em sua concentração na solução de 0,1 a 0,6 mM (Chen et al., 2018).

As plantas em sua maioria possuem Si em seus tecidos, que varia de 0,1 a 10% do peso seco de acordo com a espécie. Plantas acumuladoras apresentam teor

de Si maiores que 10 g kg^{-1} de Si na parte aérea, acumuladoras intermediárias de 5 a 10 g kg^{-1} de Si e exclusoras ou não acumuladoras, menor que 5 g kg^{-1} de Si (Ma e Takashi, 2002). Estas diferentes classificações quanto ao acúmulo de Si nas plantas estão relacionadas a presença ou ausência de transportadores específicos de Si, a exemplo do Lsi (canal de influxo) realizando o movimento do Si do solo às plantas e o Lsi2 (canal de efluxo) movimento do xilema para a parte aérea da planta (Islam et al., 2020) que estão presentes em plantas acumuladoras como gramíneas. Contudo, plantas não acumuladoras de Si apresentam absorção passiva (Ma et al., 2001) do elemento, mas já foi indicado por Raven (2001) que plantas do gênero *Phaseolus* podem apresentar absorção ativa de Si. Em estudos de Dos Santos Sarah et al. (2022) observou-se que a aplicação de Si através das raízes é capaz de induzir acúmulo melhorado de Si nesta espécie com benefícios fisiológicos e nutricionais.

O Si tem demonstrado vários benefícios às plantas quando fornecido, induzindo respostas como melhorias na fotossíntese, permite redução na transpiração, regulação da cadeia de transporte de elétrons e atuação na homeostase celular, além disso, a presença desse elemento na planta reduz os impactos dos estresses bióticos e abióticos (Shanmugaiah et al., 2023). Apesar de não ser considerado um nutriente essencial as plantas, diversos estudos têm relatado seus efeitos positivos para absorção de nutrientes, favorecendo a nutrição e o desenvolvimento das culturas agrícolas (Thakur et al., 2023). Trabalhos recentes têm indicado que o Si pode influenciar positivamente o acúmulo de nutrientes nas plantas em condições de estresse como indicado por Teixeira et al. (2020) e Teixeira et al. (2022) em cana-de-açúcar sob déficit hídrico, em que houve efeito benéfico do Si no acúmulo de N e P. Contudo, estudo de Greger et al. (2018) demonstrou que o Si pode afetar positivamente a absorção e transporte de vários macronutrientes e micronutrientes tanto em plantas acumuladoras do elemento como não acumuladoras, independentemente do tipo de solo e sem estresse imposto.

Em condição de deficiência nutricional, o Si amplia a expressão de transportadores de macronutrientes e micronutrientes na raiz, possibilitando a translocação até a parte aérea da planta, atuando na modulação metabólica e eficiência fotossintética (Ali et al., 2020). No caso do K, trabalhos indicam que o Si permite um aumento de K no xilema, mesmo que esse nutriente esteja em deficiência,

pela regulação do canal de *SKOR* por meio da mediação da secreção de K das células do córtex radicular para o xilema. Esta resposta é capaz de induzir melhoria da condutância hidráulica pelo aumento do gradiente osmótico auxiliando as plantas a melhorarem a condições hídrica afetada pela deficiência de K (Chen et al., 2016). Além disso, em plantas de feijão foi demonstrado que a aplicação de Si radicular às plantas é capaz de atenuar a deficiência de K por promover aumento do acúmulo do nutriente e da eficiência da água, fotossíntese e pigmentos fotossintéticos (dos Santos Sarah et al., 2021).

2.2 Implicações gerais sobre a decomposição de restos culturais

A prática de agricultura mais conservacionista e sustentável tem sido vista como estratégia de sustentabilidade para os sistemas agrícolas, sobretudo aos de uso de palhada como cobertura do solo e em regiões de clima tropical, onde os sistemas de produção são mais intensivos com o cultivo de mais de uma cultura. A provisão de resíduos orgânicos, originados de culturas em consórcio ou em rotação, considera-se como uma das técnicas para uma melhoria da qualidade do solo, além de aumento no aporte de matéria orgânica do solo (Silva et al., 2021).

A matéria orgânica presente no solo é um produto da atividade de microrganismos, atuando sobre resíduos vegetais, que podem ser divididos em dissolvidos e particulados: como lixiviados de folhas, serrapilheira e brotos mortos e serrapilheira de raízes respectivamente (Sokol et al., 2018). A decomposição de material vegetal está intimamente relacionada a ciclagem de nutrientes no solo e o acúmulo de matéria orgânica, que eleva a capacidade de troca de cátions, favorecendo a retenção de nutrientes. Além disso, o pH do solo pode ser aumentado a partir da liberação de cátions básicos durante a transformação dos resíduos vegetais (Berg e McClaugherty, 2020). A disponibilidade de matéria orgânica é influenciada por vários fatores como a ação de organismos decompositores da biomassa, características da própria matéria orgânica, bioquímica, das particularidades inerentes do solo, além da umidade e temperatura (Bauer et al., 2016).

A decomposição de material vegetal, possibilita que macromoléculas consideradas complexas como proteínas, celulose e lignina, sejam hidrolisadas e

mineralizadas para formar compostos de estrutura mais simples como carbono e nutrientes inorgânicos como nitrogênio, fósforo, cálcio e potássio (Bonanomi et al., 2023). Durante o processo de decomposição da matéria vegetal o C presente na matéria é liberado no solo na forma de polímeros celulose, hemicelulose e lignina, essas moléculas são quimicamente ligadas por forças não covalentes e ligações cruzadas covalentes (Pérez et al., 2002).

A “qualidade dos resíduos vegetais” está relacionado a essas moléculas de polímeros, níveis de N e de polifenóis bem como a proporção entre estes componentes, porém, se tratando de decomposição da matéria vegetal, a qualidade dos resíduos varia ao longo do tempo de transformação, isso decorre das diferentes taxas de degradação dos componentes do material vegetal (Sousa Júnior et al., 2017). Inicialmente têm-se rápida degradação do material, principalmente de compostos solúveis em água e polissacarídeos. Após inicia-se uma diminuição de compostos fenólicos solúveis e hemicelulose com posterior aumento relativo no teor de lignina (Correia e Andrade, 2008). Sendo que a lignina é um dos componentes de mais difícil degradação pelos microorganismos, enquanto a degradação de carboidratos solúveis ocorre de forma mais rápida (Gunnarsson et al., 2008). Deste modo, a taxa de decomposição e a liberação de nutrientes sofrem influência também do tempo, sendo necessária investigação para indicar melhor manejo quanto a disponibilidade de nutrientes para a cultura a ser implementada após a colheita da anterior.

A depender do material vegetal utilizado a taxa de decomposição e liberação de nutrientes também são alterados. A adoção do uso de plantas de cobertura, nas áreas de cultivo de culturas de interesse econômico, vem alcançando destaques em diversas regiões no mundo. As culturas de cobertura podem ser classificadas em folhas largas leguminosas, folhas largas não leguminosas ou gramíneas (Koudahe et al., 2022).

Leguminosas como o feijoeiro possuem alta capacidade de fixar N através da fixação biológica, alta ciclagem de nutrientes e boa cobertura do solo. Além disso, resíduos com maiores teores de nutrientes ampliam a taxa de decomposição e a liberação de nutrientes para as culturas por favorecerem o crescimento e a atividade microbiana, principalmente em solos tropicais (Cobo et al., 2002; Silva et al., 2021). Por apresentarem relação C/N baixa, as leguminosas possuem poder de degradação

mais alto que plantas C4 favorecendo o crescimento microbiano pelo fornecimento de N (Kohmann et al., 2019). Contudo, deve-se considerar um ambiente com nutrição e água adequadas, fato que pode ser alterado pela dinâmica das mudanças climáticas e estresses como o da escassez hídrica.

2.3 Relação silício e potássio na decomposição e liberação de nutrientes dos restos culturais

A presença de Si na planta pode ocasionar modificação na decomposição do material vegetal, o que pode incluir a química do material, o conteúdo de nutrientes e suas estequiometrias, bem como os padrões de compostos de carbono (Schaller et al., 2012a; Neu et al., 2017). Estes indícios indicam que ao aumentar o conteúdo nutricional na parte aérea das plantas, o Si pode beneficiar o retorno destes nutrientes ao solo através da liberação de nutrientes do material vegetal, favorecendo a próxima cultura em rotação ou sucessão (Teixeira et al., 2022).

Como a biomassa acima do solo é substancialmente colhida e removida das terras de cultivo, o aumento da biomassa das raízes contribui para ampliar o reservatório de carbono orgânico do solo. Portanto, a aplicação de Si exerce um efeito positivo na renovação do carbono orgânico do solo, o que, por sua vez, promove o acúmulo de nutrientes no solo das lavouras.

A presença de Si ainda é capaz de alterar os ciclos biogeoquímicos de C e nutrientes, afetando inclusive a desnitrificação no solo (Li et al., 2018) e ainda está envolvido nos processos de síntese de lignina (Schoelynck et al., 2010). Em estudo de Klotzbücher et al. (2018) foi verificado que o Si se correlaciona negativamente com os fenóis derivados de C e da lignina e que menores concentrações de lignina na palhada de arroz acarretaram menores taxas de decomposição do material vegetal. Este fato vem sendo demonstrado nos últimos anos com destaque para os estudos estequiométricos envolvendo o Si nas diversas espécies vegetais. O Si tem sido apontado como capaz substituir o C de compostos estruturais (Raven, 1983; Schaller e Struyf, 2013) ao mesmo tempo que pode elevar os teores de C nos tecidos e de outros nutrientes como demonstrado em cana-de-açúcar, plantas forrageiras, sorgo, milho e feijão (Costa et al., 2022; Rocha et al., 2022; de Carvalho et al., 2022; Costa et al., 2023 a,b). Além disso, é sabido que as relações estequiométricas C:N:P são

reguladas na presença de Si sendo um fator importante da qualidade dos resíduos e sua velocidade e taxa de decomposição e liberação de nutrientes (Neu et al., 2017; Deus et al., 2020). Isto modifica a qualidade do material vegetal a ser depositado no solo após a colheita, podendo alterar a dinâmica da liberação de nutrientes e da taxa de decomposição. Neste caso, observa-se que o Si pode modificar a liberação de nutrientes seja pelo incremento dos conteúdos de nutrientes no material vegetal e ainda, afetar a velocidade com que esses nutrientes são liberados ao solo, mas isto precisa ser melhor investigado.

O potássio (K) é um elemento importante para as culturas, a presença desse nutriente na nutrição das plantas, desempenha um papel de mediador para vários processos fisiológicos e bioquímicos, que são essenciais para a sobrevivência e crescimento das plantas. Pois esse macronutriente, terá diversas atuações na planta como na ativação de enzimas, síntese de proteínas, abertura e fechamento de estômatos, também no ajuste osmótico e alocação de carbono (Ishfaq et al., 2023). Além disso, o K afeta a síntese de compostos importantes que regulam a decomposição vegetal como a lignina em tecidos de sustentação como hastes (Xu et al., 2018) e a celulose pelo seu papel no transporte de carboidratos de folhas para outras partes da planta favorecendo a síntese (Prado, 2021). É consolidado o fato de em condições de nutrição inadequada com K as plantas podem acumular aminoácidos livres e compostos de baixo peso molecular devido a ineficiência da fixação de C na fotossíntese e síntese proteica (Hu et al., 2017) isso favorece a degradação mais rápida do material pelos microrganismos devido a facilidade de quebra das moléculas destes compostos. Além disso, o status de K também afeta a absorção de outros nutrientes (Costa et al., 2023 a, b) podendo afetar consequentemente a quantidade de nutrientes liberados ao solo.

Neste sentido, observa-se que tanto o Si quanto o K têm atuações relevantes no metabolismo vegetal que podem influenciar diretamente a degradação da palha das culturas em campo e a liberação de nutrientes. Contudo, estas informações ainda são desconhecidas, bem como o fornecimento destes dois elementos podem alterar o comportamento dos resíduos de leguminosas em um ciclo de cultivo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições de cultivo da planta origem

As plantas de feijão cultivar Carioca BRS FC 402 foram cultivadas em sistema de irrigação por gotejamento em condição de campo durante os meses de maio a agosto de 2022, na área da fazenda experimental da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Jaboticabal – SP, no período de maio a agosto de 2022, nas coordenadas geográficas (-21º 14’ 50.7” e 48º 17’ 01.8”) e altitude de 546 m.

O cultivo foi irrigado mantendo 80% da capacidade de retenção de água do solo as plantas foram submetidas a doses de Si (0; 4; 8 e 12 kg ha^{-1}) estabelecidas de acordo com indicação do International Rice Research Institute (IRRI) recomendando doses variando de 40 a 60 kg ha^{-1} de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente 6 a 9 kg ha^{-1} de Si) (IRRI, 1993). O Si foi fornecido via fertirrigação em duas áreas de cultivo, uma com a ausência da aplicação de potássio e a outra com uso da fertilização potássica (50 kg ha^{-1} de K_2O). Os resultados da análise química do solo na camada de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, respectivamente, foram: pH ($CaCl_2$)= 6,2 e 5,6; matéria orgânica= 20,5 e 19 g dm^{-3}; P= 59 e 36 mg dm^{-3}, S= 11 e 13 mg dm^{-3}; Ca= 37 e 40 mg dm^{-3}; Mg= 17 e 18 mmolc dm^{-3}; K= 6,2 e 6,4 mmolc dm^{-3}; H + Al= 22,5 e 23 mmolc dm^{-3}; soma de bases (SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+})= 60,6 e 64 mmolc dm^{-3}, capacidade de toca catiônica (CTC= SB + H+Al)= 82,9 e 87,2 mmolc dm^{-3} e saturação de bases (V=SBx100/CTC)= 73 e 73%. Os teores de micronutrientes do solo foram determinados na camada de 0-20 cm de profundidade: B= 0.41mg dm^{-3}; Cu= 6,4mg dm^{-3}; Fe= 11 mg dm^{-3}; Mn= 23,6 mg dm^{-3}; Zn= 3,9 mg dm-3, determinados segundo Raij et al. (2001). O Si foi fornecido via fertirrigação aos 22, 32, 38, 41, 44 e 47 dias após a emergência plena (DAE) com fonte silicato de sódio estabilizado com sorbitol (Si = 115,2 g L^{-1}, Na_2O = 60,5 g L^{-1}). O K foi fornecido utilizando KCl à lanço.

Ao final do cultivo, na maturação fisiológica das plantas de feijão (estádio R9), a palha da parte aérea foi colhida, homogeneizada e separada para deposição em campo conforme os tratamentos.

3.2 Tratamentos e delineamento experimental

Os tratamentos consistiram em esquema fatorial 4x5, tendo a palhada obtida das plantas de feijão que receberam quatro doses de Si: 0; 4; 8 e 12 kg ha^{-1} de acordo com o International Rice Research Institute (IRRI), recomendando doses variando de 40 a 60 kg ha^{-1} de silicato de potássio (15% de Si) (equivalente 6 a 9 kg ha^{-1} de Si) (IRRI, 1993). Essas doses foram combinadas com cinco tempos de avaliação da decomposição da palhada aos 0; 30; 60; 90; e 120 dias após a colheita, dispostos em blocos casualizados com quatro repetições. Estes tratamentos foram estudados em palhada da cultura do feijão que foram submetidas à adubação potássica (experimento 1) e ausência da adubação potássica (experimento 2).

3.3 Condições experimentais em campo

Na colheita,10 plantas acima do solo foram coletadas (exceto as vagens) considerando pontos na área útil da parcela, trituradas e homogeneizadas para formar uma amostra composta por parcela, conforme descrito por Crusciol et al. (2013). Após esse procedimento, 30 g do material foi alocado em 4 sacolas de decomposição, confeccionados em nylon com tamanho de 15 cm x 13 cm e posteriormente fechados (Apêndice 1A). As sacolas de decomposição foram acondicionadas na superfície da palha dos restos culturais das plantas de feijão e foram presos ao solo utilizando grampos de metal para evitar movimentação (Apêndice 1B). As sacolas de decomposição permaneceram ao solo pelo período de setembro de 2022 a janeiro de 2023, dentro de parcelas com o cultivo do milho para avaliação da decomposição aos 30, 60, 90 e 120 dias após a colheita, respectivamente. Na ocasião da colheita foi separado 30 g do material para compor o momento 0 dias após a colheita. A temperatura máxima e mínima do ar bem como a precipitação pluvial no período experimental foi registrada (Figura 1).

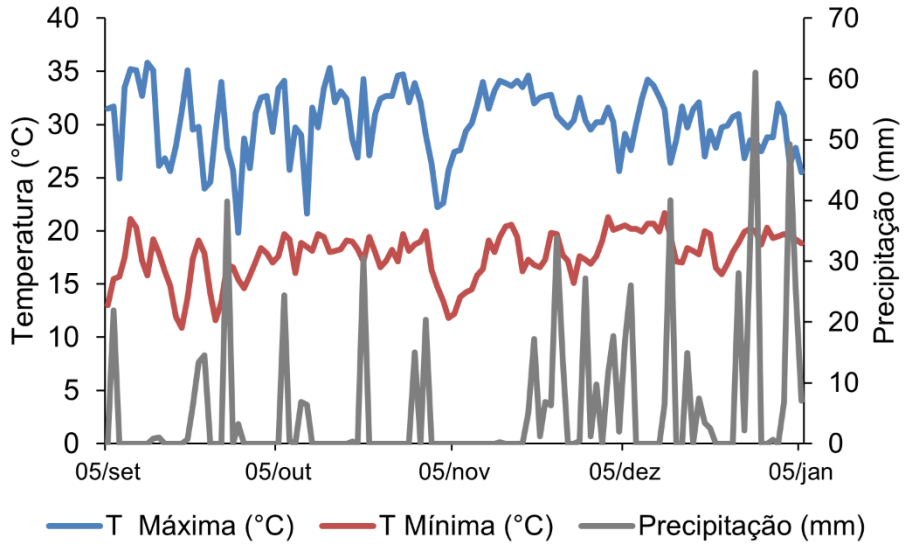


Figura 1. Temperatura mínima e máxima do ar, e precipitação durante o período experimental.

3.4 Variáveis analisadas

3.4.1 Quantidade de Si, N, C e P

A quantidade de Si, N, C e P foram obtidos a partir do produto entre a massa seca da palhada no momento da colheita (g) e os teores de Si, N, C e P (g kg^{-1}) no material vegetal. A quantidade de Si, N, C e P foram dados em gramas presentes na massa seca do material vegetal contido na sacola de decomposição no momento zero.

3.4.2 Massa seca da palhada

A palhada depositada no campo foi coletada aos 0, 30, 60, 90 e 120 dias após a colheita do feijoeiro e material foi seco em estufa de circulação forçada de ar (TE-394/3-MP, Tecnal, BR) sob 65ºC até massa constante e pesados em balança de precisão para compor os pesos secos em gramas.

3.4.3 Taxa de decomposição

Para descrever a taxa de decomposição da palhada foi utilizada a razão entre a matéria seca inicial (m0) e a matéria seca no dia da avaliação (mt) e a matéria seca inicial (m0), posteriormente multiplicada por 100 (Equação 2) de acordo com Sun et al. (2021).

$$Taxa\ de\ decomposição\ (\%) = \frac{\mathrm{m0} - \mathrm{mt}}{\mathrm{m0}} x\ 100$$

3.4.4 Taxa de liberação de nutrientes

As amostras da palhada foram secas e em seguida foi moída em moinho do tipo Willey e realizada a análise química. O teor de Si foi obtido pela extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio de acordo com a metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010) e a leitura foi realizada por espectrofotômetro (B442, Micronal, BR) a 410 nm conforme indicado por Korndörfer et al. (2004). Os teores de P, K, Ca, Mg e S foram determinadas conforme método descrito por Bataglia et al. (1983) e de C e N serão determinadas por combustão à seco a 1000°C usando um analisador elementar (LECO Truspec CHNS), calibrado com um padrão de trigo LECO 502-278 (C = 45% e N = 2,68%).

A taxa de liberação de nutrientes foi estimada pela diferença entre os produtos da massa seca inicial (m0) e concentração inicial do elemento (c0) e da massa seca (mt) e concentração do elemento (ct) no dia da avaliação dividido pelo produto da massa seca inicial (m0) e a concentração inicial do elemento (c0), e então multiplicada por 100 como descrito por Sun et al. (2021).

$$Taxa\ de\ liberação\ de\ nutrientes(\%) = \frac{m0 * \mathrm{c0} - \ mt * \mathrm{ct}}{\mathrm{m0} * \mathrm{c0}} x\ 100$$

3.5 Formas de análise dos resultados

Para os resultados obtidos os dados foram inicialmente avaliando quanto a homogeneidade e homoscedasticidade das variâncias (W de Shapiro-Wilks e Bartlett, respectivamente) e após submetidos a análise univariada pelo teste F ($p \leq 0,05$). Aos dados significativos, foram utilizados testes de comparação de médias Tukey a 5%. A

análise estatística e a elaboração de gráficos foram realizadas com o uso de linguagem de programação Python (Python Software Foundation).

4 RESULTADOS

4.1 Experimento 1

A massa seca da palhada de feijão, com adubação potássica, foi superior na dose 12 kg ha^{-1} de Si aos 30 dias de decomposição e nas doses 4 e 12 kg ha^{-1} aos 60 dias de decomposição, sem diferenças significativas na massa seca da palhada entre as doses, nos períodos de 0, 90 e 120 dias de decomposição. Contudo, as menores massas secas da palhada foram obtidas em palhada sem Si em ambos os tempos de decomposição (30 e 60 dias) (Figura 2a).

A taxa de decomposição da palhada de feijão sem Si com adubação potássica foi maior aos 30 dias e aos 60 dias de decomposição. A dose de 12 kg ha^{-1} de Si proporcionou redução de 42% e 33% na taxa de decomposição nestes mesmos períodos, respectivamente, em relação a dose 0 kg ha^{-1} (Figura 2b).

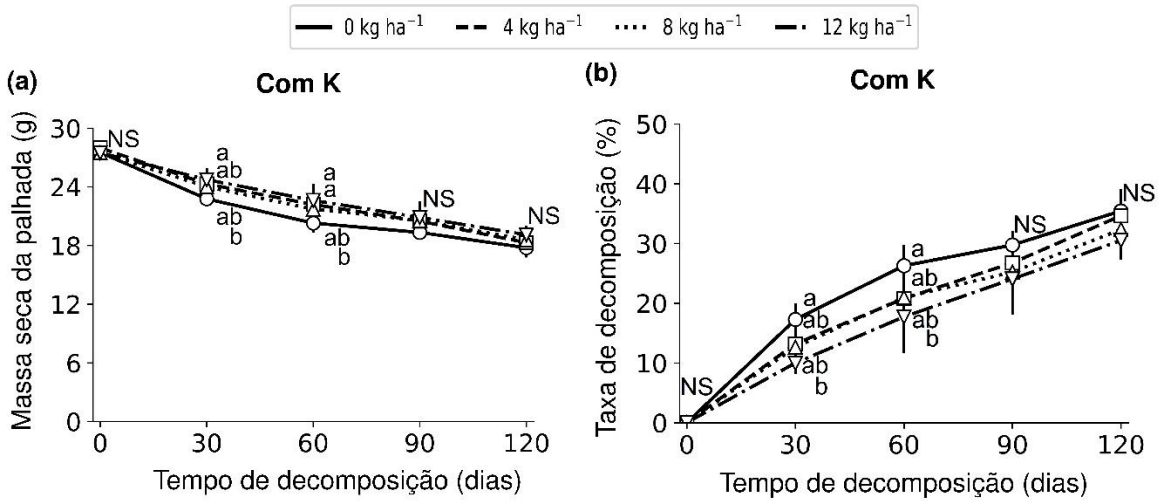


Figura 2. Massa seca e taxa de decomposição, respectivamente, da palhada de plantas de feijão que receberam adubação potássica (a, b) e doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. Letras diferem doses de Si no mesmo tempo de decomposição de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo.

A quantidade de Si e P foram afetados pelas doses de Si na condição +K com maiores acúmulos na dose 4 e menor acúmulo em palhada sem Si. A quantidade de C e N não foi influenciado pelas doses de Si (Tabela 1).

Tabela 1. Quantidade de Si, N, C e P nas sacolas de decomposição provindo de restos culturais da colheita de plantas de feijão que receberam doses de Si fornecidos via fertirrigação e adubação potássica (experimento 1).

Si	Si	N	C	P
kg ha^{-1}	---------- g por sacola ----------			
0	0,032b	0,63a	10,8 a	0,012b
4	0,040a	0,69a	11,0 a	0,017a
8	0,034b	0,67a	10,8a	0,016ab
12	0,035b	0,69a	10,9a	0,013ab

Letras diferem as doses de Si de acordo com teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo.

A taxa de liberação de macronutrientes e de Si da palhada de plantas com adubação potássica foram influenciadas pelas doses de Si aos 30, 60 e 90 dias de decomposição, exceto para o N e C (Fig. 3b, h). Não houve efeito das doses de Si na liberação aos 120 dias de decomposição.

Aos 30 dias a palhada sem Si e na dose 12 kg ha^{-1} induziu maior liberação de Si. A dose 4 kg ha^{-1} induziu maior liberação de P, K e S e a dose 8 kg ha^{-1} induziu maior liberação de K e Ca. Aos 30 dias a ordem de liberação decrescente de nutrientes e de Si que foram influenciados pelas doses de Si foi : dose 0 kg ha^{-1} (P - 55% > K - 48% > Si - 39% > S - 31% > Ca - 14%), 4 kg ha^{-1} (K - 61% > P - 52% > S - 38% > Ca - 31% > Si - 25%), 8 kg ha^{-1} (K - 55% > Ca - 37% > Si - 33% > P - 31% > S - 26%) e 12 kg ha^{-1} (Si - 42% > K - 41% > S - 29% P> - 24% > Ca - 22%) (Fig. 3a, c, d, e, g).

Aos 60 dias a dose 4 kg ha^{-1} induziu maior liberação de K, Ca, Mg e S e a dose 8 kg ha^{-1} induziu maior liberação de K e Ca. A ordem de liberação decrescente de nutrientes influenciados pelas doses de Si da palhada foi: dose 0 kg ha^{-1} (K - 58% > Mg - 48% > Ca - 47% > S - 39 %), 4 kg ha^{-1} (K - 75% > Mg - 57% > Ca - 55% > S - 54%), 8 kg ha^{-1} (K - 69% > Ca = S - 50% > Mg - 45%) e 12 kg ha^{-1} (K - 54% > Mg - 45% > S – 41% > Ca - 38%) (Fig. 3d, e, f, g).

Aos 90 dias, a palhada sem Si induziu maior liberação de S, a dose 4 kg ha^{-1} de Si induziu maior liberação de K e a dose 12 kg ha^{-1} de Si induziu maior liberação de Si. A ordem de liberação decrescentes de liberação de nutrientes e de Si que foram influenciados pelas doses de Si foi: dose 0 kg ha^{-1} (K - 71% > Si - 68% > S - 65 %), 4 kg ha^{-1} (K - 80% > Si - 61% > S – 55%), 8 kg ha^{-1} (K - 71% > Si - 66% > S - 51%) e 12 kg ha^{-1} (Si - 75%> K - 61% > S - 51%) (Fig. 3a, d, g).

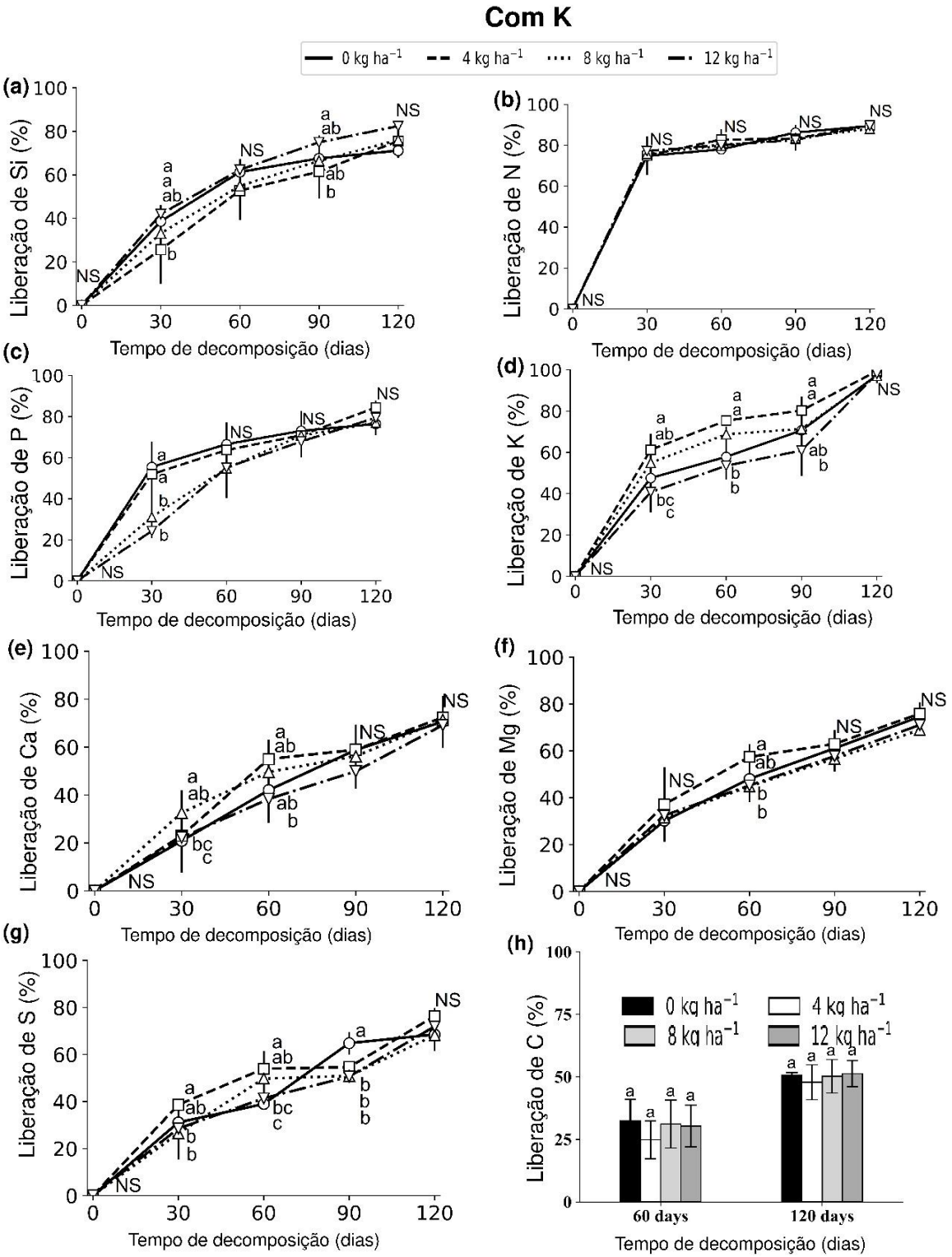


Figura 3. Taxa de liberação de Si (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), S (g) e C (h) da palhada de plantas de feijão, que receberam adubação potássica e doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. Letras diferem doses de Si no mesmo tempo de decomposição de acordo com teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo.

4.2 Experimento 2

A massa seca da palhada de feijão, sem adubação potássica, foi superior nas doses de 8kg ha^{-1} aos 90 dias de decomposição e nas doses 0, 4 e 8 kg ha^{-1} aos 120 dias, enquanto a palhada de plantas sem Si aos 90 dias apresentou menor massa seca, porém aos 120 dias a palhada de plantas com Si na maior dose (12 kg ha^{-1}) apresentaram a menor massa seca (Figura 4a). Em palhada de plantas sem adubação potássica a taxa de decomposição foi superior quando não enriquecidas com Si aos 90 dias de decomposição enquanto as enriquecidas com Si na dose de 8 kg ha^{-1} apresentaram a menor taxa (45%) aos 90 dias em relação à dose 0 kg ha^{-1}. Aos 120 dias a maior taxa de decomposição ocorreu em palhada de plantas que receberam Si na dose 12 kg ha^{-1} e a palhada de plantas que receberam 0, 4 e 8 kg ha^{-1} de Si apresentaram menor decomposição em 19% em relação à dose 12 kg ha^{-1} sem diferenças significativas entre as doses nos períodos de 0, 30 e 60 dias de decomposição (Figura 4b).

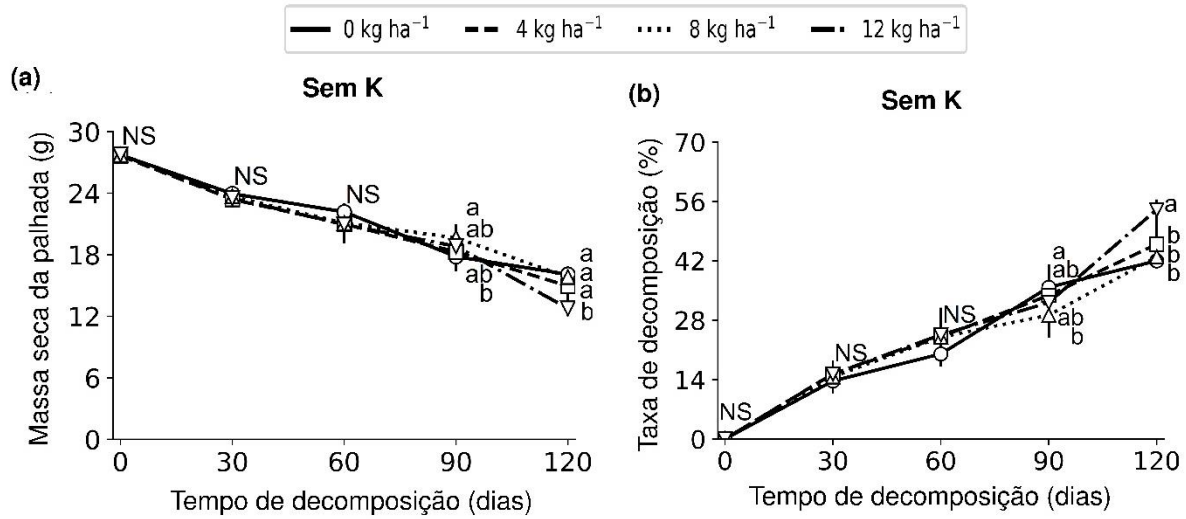


Figura 4. Massa seca e taxa de decomposição, respectivamente, da palhada de plantas de feijão que não receberam adubação potássica (a, b) e receberam doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. Letras diferem doses de Si no mesmo tempo de decomposição de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo.

Na condição -K, maior quantidade de Si ocorreu na dose 8 kg ha^{-1}. A quantidade de N apenas foi afetada pelas doses de Si na condição -K com maior quantidade na

dose 4 e menor quantidade em palhada sem Si. A quantidade inicial de C e P não foi influenciado pelas doses de Si (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade de Si, N, C e P nas sacolas de decomposição provindo de restos culturais da colheita de plantas de feijão que receberam doses de Si fornecidos via fertirrigação sem adubação potássica (experimento 2).

Si	Si	N	C	P
kg ha^{-1}	---------- g por sacola ----------			
0	0,030bc	0,65b	10,8a	0,015a
4	0,026c	0,75a	10,9a	0,019a
8	0,038 a	0,73ab	11,1a	0,015a
12	0,033b	0,75ab	11,2a	0,014a

Letras diferem as doses de Si de acordo com teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo.

Em palhada de plantas sem adubação potássica houve influência das doses de Si para a liberação de macronutrientes e de Si aos 30, 60 e 120 dias. Aos 30 dias, a dose 4 kg ha^{-1} de Si induziu maior liberação de N e Mg. Já a dose 8 kg ha^{-1} de Si proporcionou maior liberação de Si, K, Ca e Mg da palhada de feijão. A ordem de liberação decrescente de nutrientes e de Si na palhada que foram influenciados pelas doses de Si para cada dose foi: 0 kg ha^{-1} (N - 71% > K - 42% > Si = Mg - 23% > Ca - 17%), 4 kg ha^{-1} (N - 81% > K - 56% > Mg - 38% > Ca - 34% > Si – 22%), 8 kg ha^{-1} (N - 74% > K - 66% > Si - 59% > Ca - 49% > Mg - 37%) e 12 kg ha^{-1} (N - 72% > K - 49% > Si – 34% > Mg – 33%> Ca - 19%) (Fig. 5a, b, d, e, f).

Aos 60 dias, a dose 4 kg ha^{-1} de Si induziu maior liberação de N, P e K. Contudo, a dose 8 kg ha^{-1} induziu maior liberação de S e de C. A liberação de C também foi maior quando a palhada era de plantas que receberam a dose 12 kg ha^{-1} de Si. A ordem de liberação decrescente de nutrientes e de Si que foram influenciados pelas doses de Si em cada dose foi: 0 kg ha^{-1} (N – 77% > Si=P - 66% > K - 59% > S - 37% > C - 22%), 4 kg ha^{-1} (N - 86% > K – 75% > P - 69% > S - 47% > Si - 43% > C - 32%), 8 kg ha^{-1} (N – 83% > K - 70% > Si – 61% > P - 59% > S - 53% > C - 35%) e 12 kg ha^{-1} (N – 80% > K – 63% > P - 54% > Si - 53% > S - 39% > C - 34%) (Fig. 5a, b, c, d, g, h). Aos 120 dias de decomposição apenas a liberação de C foi afetada pelas doses de Si apresentando liberação de ordem decrescente de liberação nas doses 12 kg ha^{-1} (68%)> 0 kg ha^{-1} (55%) > 4 kg ha^{-1} = 8 kg ha^{-1} (58%).

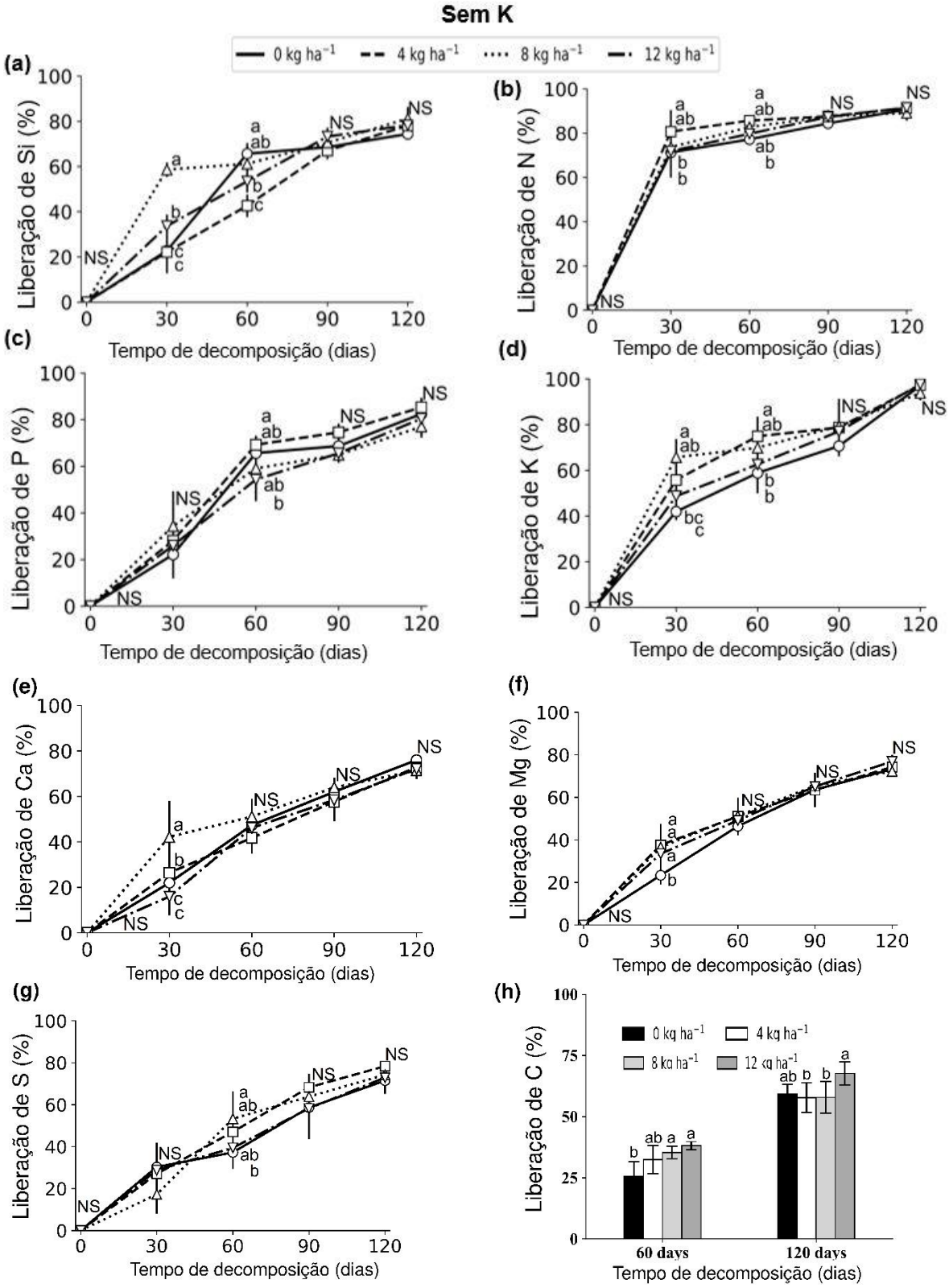


Figura 5. Taxa de liberação de Si (a), N (b), P (c), K (d), Ca (e), Mg (f), S (g) e C (h) da palhada de plantas de feijão que não receberam adubação potássica e receberam doses de Si fertirrigadas: 0, 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. Letras diferem doses de Si no mesmo

tempo de decomposição de acordo com teste de Tukey a 5% de probabilidade. NS: não significativo

5 DISCUSSÃO

Neste estudo foi verificado o papel do Si e do K fornecido às plantas na dinâmica do processo de decomposição dos restos culturais no campo. Pela primeira vez analisou-se este efeito em restos culturais do feijoeiro, uma leguminosa amplamente cultivada em regiões de clima tropical.

O efeito da aplicação de Si modificou os padrões de decomposição do material no tempo com resposta modulada pelo K. O Si retardou as taxas de decomposição em período inicial em material que recebeu adubação potássica, mas esse efeito desaparece em período final de avaliação, aos 90 e 120 dias (Fig. 2). A boa nutrição de K proporciona maior desempenho metabólico com aumento dos conteúdos de carboidratos, aminoácidos e proteínas e, portanto, com potencial de degradação inicial mais elevada (Gunnarsson et al., 2008; Prado, 2021). Isso demonstra que a alteração da taxa de decomposição neste caso, proporcionado pelo Si, possivelmente esteve associada a presença de Si nos tecidos e a produção de compostos produzidos pela planta durante o cultivo, pois não esteve associado aos aumentos de C e N. O Si pode ter modificado a composição de outras moléculas de degradação mais lenta a exemplo da celulose, hemicelulose e pectinas fato relatado por (Schoelynck et al., 2010), principalmente em tecidos não direcionados a sustentação como as folhas que predominam na fase inicial da decomposição (Sheng e Chen, 2020; Schaller et al., 2012a). Soma-se a isso o fato de que o Si absorvido por se encontrar em forma de fitólito, pode diminuir a decomposição e ação de microorganismos decompositores mesmo em períodos iniciais (Schaller et al., 2014).

Por outro lado, a boa nutrição com K influencia a dinâmica de degradação pois auxilia na manutenção da produção de compostos de sustentação como a lignina (Xu et al., 2018) e celulose nas plantas devido melhor distribuição de carboidratos das folhas para os diferentes órgãos, favorecendo a produção destes compostos estruturais (Prado, 2021) que são degradados de forma mais lenta. Neste sentido, sugere-se que nesta condição, as plantas não induziram a troca de C por Si, pois o

metabolismo de síntese proteica, fotossíntese e transporte de carboidratos foi mantido na planta não afetando a decomposição em período final.

A redução da decomposição em leguminosa obtida neste estudo traz nova perspectiva do uso de Si e seus mecanismos, visando manutenção da cobertura vegetal por mais tempo em sistemas de plantio direto, principalmente em clima tropical onde há rápida decomposição pela influência da pluviosidade e temperatura elevadas que converge em rápida atividade biológica do solo (Ross,1993). Este resultado possui uma importante implicação prática em cultivos de sucessão, pois a próxima cultura é instalada logo após a colheita da cultura anterior, fase simulada neste estudo. Nesta fase inicial, a permanência da palhada no campo ajuda a planta em sucessão no estabelecimento, limita o desenvolvimento de plantas daninhas e proporciona proteção ao solo (Matloob et al., 2015), e, portanto, a fertilização com Si durante o cultivo auxilia o manejo sustentável da cadeia produtiva visto que, o período inicial demanda maior atenção. Após esse período crítico, ocorre o desenvolvimento normal da parte aérea da planta e, portanto, há a manutenção de condição favorável de crescimento.

Uma segunda resposta destaca-se neste estudo, pois na falta de adubação potássica, o Si na maior dose (12 kg ha^{-1}) aumentou a decomposição aos 120 dias. Possivelmente o efeito do Si principalmente neste período, esteve associado a menor produção dos compostos ricos em C como a lignina que é o composto com maior resistência a degradação no processo de decomposição pela força de suas ligações covalentes (Pérez et al., 2002; Gunnarsson et al., 2008). Existem relatos de uma relação negativa entre o Si e conteúdo de lignina em alguns estudos (Schaller et al., 2012a; Klotzbücher et al., 2018), além disso, a falta de adubação potássica pode limitar a fotossíntese e a assimilação de C resultando na menor formação que compostos com C (Hu et al., 2017; Ibrahim et al., 2020) principalmente, diante da alta exigência nutricional das plantas em cultivo fertirrigado. Neste caso, o enriquecimento com Si conduziu a troca do Si por C em compostos estruturais devido ao menor custo energético para incorporação (Raven, 1983). Este fenômeno tem sido elencado como um dos fatores responsáveis pela aceleração da decomposição de materiais ricos em Si pelas modificações nos conteúdos de C e suas relações com outros nutrientes nas plantas (Schaller et al., 2012b; Neu et al. 2017; Carvalho et al., 2022).

Contudo, estes relatos englobavam apenas gramíneas com alto poder de acumular Si (Schaller e Struyf 2013; Marxen et al., 2016; Klotzbücher et al., 2018). Portanto, esta resposta em leguminosa traz novas perspectivas, mas deve-se considerar que a modificação do fornecimento de K altera estas respostas. Estas respostas confirmam a primeira hipótese deste estudo pois o Si é capaz de alterar a decomposição do material vegetal e modulando sua decomposição.

Por outro lado, e uma resposta positiva do Si, foi que a taxa de liberação de nutrientes foi favorecida pela adubação com Si e esteve associada ao enriquecimento de Si no tecido vegetal em ambas as condições de adubação potássica. O interesse pela liberação de nutrientes se dá principalmente visando melhor manejo da cultura seguinte no sistema de plantio, sendo importante a liberação de nutrientes em consonância com a demanda da próxima cultura na sucessão ou rotação. Em sistema de cultivo de rotação, a cultura seguinte da leguminosa geralmente é uma gramínea, neste caso, espécies com bom acúmulo de Si (Mandlik et al., 2020).

Destaca-se que, a palhada enriquecida com Si e com adubação potássica apresentou liberação do elemento de forma mais lenta e gradual em relação a palhada sem Si ao longo dos 120 dias. Sem adubação potássica foi observado comportamento contrário, tendência que seguiu ao longo do tempo, não estando ligado a taxa de decomposição. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Nakamura et al. (2020) onde é explicado pelo fato de que a variação da dissolução de Si é controlada não apenas pela taxa de decomposição e concentração de Si, mas pelo estado de condensação de Si, morfologia e localização das opalas das plantas. Este resultado é importante pois indica que o Si de plantas enriquecidas com K podem fornecer Si para gramíneas seguindo o crescimento radicular, ao passo que em condição sem adubação potássica, o Si liberado pode não ser totalmente reaproveitado, com risco de lixiviação.

Os macronutrientes apresentaram alta liberação de nutrientes em período inicial de decomposição nas duas condições de K. Destaca-se que os nutrientes N e K apresentaram as maiores taxas de liberação da palhada de feijão, ultrapassando os 40% neste período. Isto ocorre devido a necessidade de consumo de compostos ricos em N pelos microrganismos no início do processo de decomposição (Yang et al., 2022) e pelo fato do K ser facilmente liberado do material vegetal por permanecer em

sua forma iônica não ligado a compostos estruturais (Li et al., 2014). Contudo, um aumento substancial foi observado na liberação de K em período mais avançado. Isto possivelmente ocorreu devido ao aumento da intensidade de chuva nesse período com um acumulado de 331 mm (Fig.1) confirmando a alta influência da chuva na liberação deste nutriente, já observado em outros estudos com leguminosas e gramíneas (Rodriguez-Lizana et al., 2010).

Neste estudo o Si aumentou a liberação dos macronutrientes P, K, Ca, Mg e S em ambas as condições de K até os 60 dias, principalmente de K alcançando aumentos de até 20%, enquanto a palhada sem Si libera menos N, K, Ca, Mg, S e C neste mesmo período. Este resultado permite aceitar a segunda hipótese deste estudo e evidenciar o benefício do Si nos ciclos de reposição de nutrientes no solo de palhada de feijão. Além disso, os períodos iniciais são cruciais para a absorção da maioria dos nutrientes nas culturas e acúmulos essenciais para a fase de enchimento de grãos da cultura sucessora (Prado, 2021) e período em que acontecem adubações de cobertura de N e K, demonstrando indício de que o Si pode favorecer a sustentabilidade das adubações. Percebeu-se que a liberação de K tem forte influência do Si, e isto pode estar associado ao fato de que na precipitação de Si para formar fitólitos, o K pode ser ocluído no corpo de sílica e a presença de Si favorece a maior liberação de K (Nguyen et al., 2015; Yang et al., 2021).

O aumento da liberação de P em plantas com adubação potássica e de N em plantas sem adubação aos 30 dias pode estar associada aos aumentos nos acúmulos destes elementos durante o cultivo das plantas o que refletiu em maior quantidade destes elementos no material inicial (Tabela 1). Esta resposta já foi demonstrada por (Schaller e Struyf, 2013) em gramínea onde o conteúdo inicial aumentado de alguns macronutrientes proporcionados pelo Si foi responsável pela maior liberação da palhada.

Destaca-se ainda que o K influenciou a ação do Si na liberação de C. Em palhada de plantas com adubação potássica o Si não influenciou a liberação de C ao final de 120 dias, contudo, aumentou a liberação de C da palhada sem adubação potássica, mas rica em Si aos 60 dias. Nesta condição de K, é possível que o Si acumulado em compostos estruturais tenha favorecido o direcionamento de C para outros processos metabólicos com foco no crescimento (Raven, 1983), pois numa

nutrição inadequada de K diminui o transporte de carboidratos acumulando estes compostos em folhas (Hu et al., 2017) favorecendo a liberação. Contudo, aos 120 dias a liberação de C foi elevada em palhada com baixo acúmulo de Si, possivelmente pelo fato de neste período mais avançado a liberação de C estar associada a decomposição de materiais estruturais ricos em C, e material com menor conteúdo de Si não favoreceu a economia de energia pela inserção de Si em estruturas da parede celular como Si-celulose (Yoshida, 1965) e lignina (Schaller et al., 2012a).

Este estudo traz informações iniciais que comprovam que o manejo de adubação potássica e Si pode alterar a decomposição e liberação de nutrientes da palhada de feijoeiro em clima tropical. Estas respostas reforçam que o Si fornecido às plantas leguminosas induz permanência da palha no campo por mais tempo mesmo em condições ambientais e estruturais que favorecem a rápida decomposição da palha e ao mesmo tempo aumentar a liberação de nutrientes para a cultura seguinte, evidenciando que o uso do Si é promissor visando melhoria das condições de solo e os ciclos biogeoquímicos dos nutrientes no solo.

6 CONCLUSÕES

Com base nas descobertas apresentadas, podemos concluir que a aplicação de silício via fertirrigação e de potássio no feijoeiro tem um impacto significativo na decomposição dos restos culturais dessa leguminosa. Notavelmente, quando aplicado em conjunto com adubação potássica retarda a decomposição nos primeiros 60 dias nas doses 4, 8 e 12 kg ha^{-1}. No entanto, quando a palhada foi proveniente de plantas não adubadas com K, o Si na dose 12 kg ha^{-1} amplia a taxa de decomposição nas fases posteriores da avaliação dos restos culturais.

Adicionalmente, aplicação de Si via fertirrigação nas doses 4 e 8 kg^{-1} em plantas de feijoeiro, resulta palhada com liberação ampliada de Si, N, P, K, Ca, Mg e S até os 60 dias após a colheita, em ambas as condições de K. Isso sugere que o Si desempenha um papel crucial na regulação da decomposição dos restos culturais e na disponibilidade de nutrientes no solo.

7 REFERÊNCIAS

Ali N, Rethore E, Yvin JC, Hosseini SA, (2020) The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, 9,1779; https://doi:10.3390/plants9121779

Bai J, Li Y, Zhang J, Xu F, Bo Q, Zelin W, Li Z, Li S, Shen Y, Yue S (2021) Straw returning and one-time application of a mixture of controlled release and solid granular urea to reduce carbon footprint of plastic film mulching spring maize. **Journal of Cleaner Production** 280:124478. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124478

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani PR, Gallo JR (1983) **Métodos de análise química de plantas.** Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 48p. (Boletim Técnico 78).

Bauer D, Santos EL, Schmitt JL (2016) Avaliação da decomposição de serrapilheira em dois fragmentos de Caatinga no Sertão Paraibano. **Pesquisas, Botânica**, 69: 307-318.

Berg B, McClaugherty C (2020) Plant litter: decomposition, humus formation, carbon sequestration, 4ª ed. Switzerland: Springer, 332p. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59631-6.

Bonanomi G, Motti R, Marco A, Idbella M (2023) Temperature sensitivity and decomposition rate of 101 leaf litter types from Mediterranean ecosytems. **Science of The Total Environment,** 894: 165026. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165026.

Camargo MS (2016) Efeitos do silício na tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos. **International Plant Nutrition Institute (IPNI)**, Piracicaba, São Paulo, 155: p. 1-9.

Carvalho JLN, Otto R, Franco HCJ, Trivelin PCO (2013) Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola** 70:336–344. https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500008

Chen D, Cao B, Wang S, Liu P, Deng X, Yin L, Zhang S (2016) Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, 6: 22882. https://doi.org/10.1038/srep22882

Chen D, Wang S, Yin l, Deng X (2018) How does silicon mediate plant water uptake and loss under water deficiency? **Frontiers in Plant Science**, 9: 281. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00281

Cobo JG, Barrios E, Kass DCL, Thomas RJ (2002) Decomposition and nutrient release by green manure in a tropical hillside agroecosystem. **Plant Soil**, 240:331-342. https://doi.org/10.1023/A:1015720324392

Correia MEF, Andrade AG (2008) Formação de serapilheira e ciclagem de¸ nutrientes. In.: Santos GA (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Brazil: Metropole, 2008. p. 137–158.

Costa MG, de Mello Prado R, dos Santos Sarah M, Souza Júnior JP (2023b) Silicon, by promoting a homeostatic balance of C:N:P and nutrient use efficiency, attenuates K deficiency, favoring sustainable bean cultivation. **BMC Plant Biology** 23:213. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04236-5

Costa MG, de Mello Prado R, dos Santos Sarah MM, Souza ARS, Souza Júnior JP (2023a) Silicon mitigates K deficiency in maize by modifying C, N, and P stoichiometry and nutritional efficiency. **Scientific Reports** 2023 13:1 13:1–18. https://doi.org/10.1038/s41598-023-44301-5

Crusciol CAC, Ferrari Neto J, Soratto RP, da Costa CHM (2013) Cycling of nutrients and silicon in pigeonpea and pearl millet monoculture and intercropping. **Revista Brasielira de Ciência do Solo** 37:1628–1640. https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600019

da Silva AA, Linhares PCA, de Andrade LIF, Chaves JTL, Barbosa JPRAD, Marchiori PER (2021) Potassium Supplementation Promotes Osmotic Adjustment and Increases Water Use Efficiency in Sugarcane Under Water Deficit. **Sugar Tech** 23:1075–1084. https://doi.org/10.1007/S12355-021-00997-1/FIGURES/9

de Carvalho JS, Frazão JJ, de Mello Prado R, Souza Júnior JP, Costa MG (2022) Silicon modifies C:N:P stoichiometry and improves the physiological efficiency and dry matter mass production of sorghum grown under nutritional sufficiency. **Scientific Reports** 12:1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20662-1

Debona D, Rodrigues FA, Datnoff IE (2017) Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual review of phytopathology** 55: 85-107. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312

Dechen AR, Nachtigall GR (2007) Elementos requeridos à nutrição de plantas. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, Minas Gerais, p. 91-132, 2007.

Deus ACF, de Mello Prado R, de Cássia Félix Alvarez R, de Oliveira RLL, Felisberto G. (2020). Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**. 12, 997–1005. https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5

dos Santos Sarah MM, de Mello Prado R, de Souza Júnior JP, Teixeira GCM, Duarte JCS, Medeiros RLS (2021) Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **Scientific Reports** 11:1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-021-99194-z

dos Santos Sarah MM, de Mello Prado R, Teixeira GCM, Souza Júnior JP, Medeiros RLS, Barreto RF (2022) Silicon Supplied Via Roots or Leaves Relieves Potassium

Deficiency in Maize Plants. **Silicon** 14: 773–782. https://doi.org/10.1007/s12633-020-00908-1

Greger M, Landberg T, Vaculík M (2018) Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species. **Plants** 7: 41. https://doi.org/10.3390/plants7020041

Gunnarsson S, Marstop H, Dahlin AS, Witter E (2008) Influence of non-cellulose structural carbohydrate composition on plant material decomposition in soil. **Biology and Fertility of Soils,** 45: 27–36. https://doi.org/10.1007/s00374-008-0303-5

Hao Q, Yang S, Song Z, Li Z, Ding F, Yu C, Hu G, Liu H (2020) Silicon Affects Plant Stoichiometry and Accumulation of C, N, and P in Grasslands. **Frontiers in Plant Science** 11:518272. https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01304/BIBTEX

Hishinuma T, Azuma J ichi, Osono T, Takeda H (2017) Litter quality control of decomposition of leaves, twigs, and sapwood by the white-rot fungus Trametes versicolor. **European Journal of Soil Biology** 80:1–8. https://doi.org/10.1016/J.EJSOBI.2017.03.002

Hu W, Coomer TD, Loka DA, Oosterhuis DM, Zhou Z (2017) Potassium deficiency affects the carbon-nitrogen balance in cotton leaves. **Plant Physiology and Biochemistry** 115:408–417. https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2017.04.005

Ibrahim MFM, El-Samad GA, Ashour H, El-Sawy AM, Hikal M, Elkelish A, El-Gaward HA, El-Yazied AA, Hozzein WN, Farag R (2020) Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by exogenous potassium silicate under deficit irrigation and semiarid conditions. **Agronomy** 10:. https://doi.org/10.3390/agronomy10081212

IRRI, 1993. Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998. **International Rice Research Institute**, Los Banos, Philippines.

Islam W, Tayyab M, Khalil F, Hua Z, Huang Z, Chen YH (2020) Silicon-mediated plant defense against pathogens and insect pests. **Pesticide Biochemistry and Physiology,** 168: 104641. https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.10464.

Ishfaq M, Kiran A, Wakeel A, Tayyab M, Li X (2023) Foliar-applied potassium triggers soil potassium uptake by improving growth and photosynthetic activity of wheat and maize. **Journal of Plant Nutrition** 46:11, 2691-270, https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2160748

Johnson R, Vishwakarma K, Hossen MdS, Kumar V, Shackira AM, Puthur JT, Abdi G, Sarraf M, Hasanuzzaman M (2022) Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry** 172: 56-69. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.01.001

Khan I, Awan SA, Rizwan M, Brestic M, Xie W (2023) Silicon: an essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. **Plant Growth Regulation** 100, 301–319. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00872-3

Klotzbücher T, Klotzbücher A, Kaiser K, Vetterlein D, Jahn R, Mikutta R (2018) Variable silicon accumulation in plants affects terrestrial carbon cycling by controlling lignin synthesis. **Global Change Biology** 24:e183–e189. https://doi.org/10.1111/GCB.13845

Kohmann MM, Sollenberger LE, Dubeux JCJR, Silveira ML, Moreno LS (2019) Legume proportion in grassland litter affects decomposition dynamics and nutrient mineralization. **Agronomy Journal**,111:1079–1089. https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0603

Korndörfer GH, Pereira HS, Nolla A (Eds) (2004) Análise de silício no solo, planta e fertilizantes, Uberlândia: UFU, 50p.

Koudahe K, Allen SC, Djaman K (2022) Critical review of the impact of cover crops on soil Properties. International **Soil and Water Conservation Research**, 10:343-354. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003

Kraska JE, Breitenbeck GA (2010) Simple, Robust Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 41:2075–2085. https://doi.org/10.1080/00103624.2010.498537

Lata-Tenesaca LF, de Mello Prado R, de Cássia Piccolo M, Silva DL, Silva, JL (2021) Silicon modifies C:N:P stoichiometry, and increases nutrient use efficiency and productivity of quinoa. **Scientific Reports** 11:1–9. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89416-9

Li H, Dai M, Dai S, Dong X (2018) Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland – A review. **Ecotoxicology Environmental Safety** 159:293–300. https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.05.014

Li J, Lu J, Li X, Ren T, Cong R, Zhou L (2014) Dynamics of Potassium Release and Adsorption on Rice Straw Residue. **PLoS One** 9:90440. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0090440

Li ZC, Song ZL, Yang XM, Song AL, Yu CX, Wang T, XIA SP, Lian YC (2018) Impacts of silicon on biogeochemical cycles of carbon and nutrients in croplands. **Journal of Integrative Agriculture** 17: 2182-2195.

Liu C, Lu M, Cui J, Li B, Fang C (2014) Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. **Global Change Biology** 20:1366–1381. https://doi.org/10.1111/GCB.12517

Lynch MJ, Mulvaney MJ, Hodges SC, Thompson TL, Thomason WE (2016) Decomposition, nitrogen and carbon mineralization from food and cover crop residues in the central plateau of Haiti. **Springerplus** 5:973. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2651-1

Ma JF, Miyake Y, Takahashi E (2001) Silicon as a beneficial element for crop plants. In.: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (Eds. **Studies in Plant Science**, Elsevier, 8: 17-39. https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9

Ma JF, Takahashi E (2002) **Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan**. Amsterdam: Elsevier.

Mandlik R, Thakral V, Raturi G, Shiinde S, Nikolic M, Tripathi DK, Sonah H, Deshmukh R (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. **Journal of Experimental Botany** 71:6703–6718. https://doi.org/10.1093/JXB/ERAA301

Marxen A, Klotzbücher T, Jahn R, Kaiser K, Nguyen VS, Schmidit A, Schädler M, Vetterlein D (2016) Interaction between silicon cycling and straw decomposition in a silicon deficient rice production system. **Plant and Soil** 398:153–163. https://doi.org/10.1007/S11104-015-2645-8/TABLES/4

Matloob A, Khaliq A, Chauhan BS (2015) Weeds of Direct-Seeded Rice in Asia: Problems and Opportunities. In.: Sparks DL (Ed) **Advances in Agronomy**, Academic Press, 130: 291-336. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2014.10.003

Mostofa MG, Rahman MDM, Ghosh TK, Kabir AH, Abderlrahman M, Khan MDAR, Mochida K, Tran LSP (2022) Potassium in plant physiological adaptation to abiotic stresses. **Plant Physiology and Biochemistry** 186: 279-289. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.07.011

Nakamura R, Cornelis JT, de Tombeur F, et al (2020) Diversity of silicon release rates among tropical tree species during leaf-litter decomposition. **Geoderma** 368:114288. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2020.114288

Neu S, Schaller J, Dudel EG (2017). Silicon availability modifies nutrient use efficiency and content, C:N:P stoichiometry, and productivity of winter wheat (*Triticum aestivum* L.). **Scientific Reports** 7:40829. https://doi.org/10.1038/srep40829

Nguyen MN, Dultz S, Picardal F, Bui ATK, Pham QV, Schieber J (2015) Release of potassium accompanying the dissolution of rice straw phytolith. **Chemosphere** 116:371-376. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.059

Nieves-Cordones M, Alemán F, Martínez V, Rubio F (2014). K+ uptake in plant roots. The systems involved, their regulation and parallels in other organisms. **Journal of Plant Physiology** 171: 688–695. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.09.021

Pei ZF, Ming DF, Liu D, Wan GL, Geng XX, Gong HJ, Zhou WJ (2010) Silicon Improves the Tolerance to Water-Deficit Stress Induced by Polyethylene Glycol in Wheat

(*Triticum aestivum* L.) Seedlings. **Journal of Plant Growth Regulation** 29:106–115. https://doi.org/10.1007/S00344-009-9120-9/TABLES/6

Pereira HS, Korndörfer GH, Moura WF, Corrêa GF (2003) Extratores de silício disponível em escórias e fertilizantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27: 265-274.

Pérez J, Muñoz-Dorado J, De La Rubia T, Martiniez J (2002) Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicelulose and lignin: an overview. **International Microbiology** 5: 53 – 63. https://doi.org/10.1007/s10123-002-0062-3

Prado RM (2021) **Mineral nutrition of tropical plants**. 339p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4/COVER

Ragel P, Raddatz N, Leidi EO, Quintero FJ, Pardo JM (2019) Regulation of K+ Nutrition in Plants. **Frontiers in Plant Science** 10:281. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00281

Rahman A, Wallis CM, Uddin W (2015) Silicon-induced systemic defense responses in perennial ryegrass against infection by *Magnaporthe oryzae*. **Phytopathology** 105:748–757.https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-14-0378-R

Raij BV, de Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas-SP.

Raven JA (1983) THE TRANSPORT AND FUNCTION OF SILICON IN PLANTS. **Biological Reviews** 58:179–207. https://doi.org/10.1111/J.1469-185X.1983.TB00385.X

Raven JA (2001) Silicon transport at the cell and tissue level. In.: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (Eds.) **Studies in Plant Science**, Elsevier, 8: 41-55. https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80007-0

Rocha JR, Prado RM, Piccolo MC (2022) New outcomes on how silicon enables the cultivation of *Panicum maximum* in soil with water restriction. **Scientific Reports.** 12:1897. https://doi.org/10.1038/s41598-022-05927-z

Rodríguez-Lizana A, Carbonell R, González P, Ordóñez R (2010) N, P and K released by the field decomposition of residues of a pea-wheat-sunflower rotation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems** 87:199–208. https://doi.org/10.1007/S10705-009-9328-X/FIGURES/2

Ross SM (1993) Organic matter in tropical soils: current conditions, concerns and prospects for conservation. **Progress in Physical Geography** 17:265-305. https://doi.org/10.1177/030913339301700301

Sardans J, Peñuelas P (2021) Potassium Control of Plant Functions: Ecological and Agricultural Implications. **Plants** 10: 419. https://doi.org/10.3390/plants10020419.

Schaller J, Brackhage C, Dudel EG (2012a) Silicon availability changes structural carbon ratio and phenol content of grasses. **Environmental and Experimental Botany** 77:283–287. https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2011.12.009

Schaller J, Brackhage C, Gessner MO, Bäuker E, Gert Dudel, E (2012b) Silicon supply modifies C:N:P stoichiometry and growth of *Phragmites australis*. **Plant Biology** 14: 392–396. https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.2011.00537

Schaller J, Hines J, Brackhage C, Baucker E, Gessner MO (2014) Silica decouples fungal growth and litter decomposition without changing responses to climate warming and N enrichment**. Ecology** 95:3181–3189. https://doi.org/10.1890/13-2104.1

Schaller J, Struyf E (2013) Silicon controls microbial decay and nutrient release of grass litter during aquatic decomposition. **Hydrobiologia** 709:201–212. https://doi.org/10.1007/S10750-013-1449-1/FIGURES/4

Schoelynck J, Bal K, Backx H, Okruszko T, Meire P, Struyf E (2010) Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose? **New Phytologist** 186:385–391. https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2009.03176.X

Shanmugaiah V, Gauba A, Hari S, K, Prasad R, Ramamoorthy V, Sharma P, M (2023) Effect of silicon micronutrient on plant's cellular signaling cascades in stimulating plant growth by mitigating the environmental stressors. **Plant Growth Regulation** (2023) 100:391–408 https://doi.org/10.1007/s10725-023-00982-6

Sheng H, Chen S (2020) Plant silicon-cell wall complexes: Identification, model of covalent bond formation and biofunction. **Plant Physiology and Biochemistry** 155:13–19. https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2020.07.020

Silva JP, Teixeira RS, Silva IR, Soares EMB, Lima AMN (2021). Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical Soil**. European Journal of Soil Science** 73:e13151. https://doi.org/10.1111/ejss.13151 .

Singhal RK, Fahad S, Kumar P, Choyal P, Javed T, Jinger D, Singh P, Saha D, Prathiha MD, Bose B, Akash H, Gupta NK, Sodani R, Dev D, Suthar DI, Liu K, Harrison MT, Saud S, Shah AN (2023) Beneficial elements: New players in improving nutrient use efficiency and abiotic stress tolerance. **Plant Growth Regulation** 100, 237–265. https://doi.org/10.1007/s10725-022-00843-8

Sokol NW, Kuebbing SE, Karlsen-Ayala E, Bradford MA (2018). Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. **New Phytologist** 221: 233-246. https://doi.org/10.1111/nph.15361

Soumare A, Sarr D, Diédhiou AG (2023) Potassium sources, microorganisms and plant nutrition: Challenges and future research directions. **Pedosphere** 33: 105–115. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.025

Sousa Júnior JGA, Cherubin MR, Cerri CEP, Cerri CC, Feigl BJ (2017) Sugar cane straw left in the field during harvest: decomposition dynamics and composition changes. **Soil Research** 55:758-768. http://dx.doi.org/10.1071/SR16310

Sun L, Sun Z, Hu J, Yaa O-K, Wu J (2021) Decomposition Characteristics, Nutrient Release, and Structural Changes of Maize Straw in Dryland Farming under Combined Application of Animal Manure. **Sustainability** 13:7609. https://doi.org/10.3390/SU13147609

Thakur A, Singh A, Tandon A, Sharma V (2023) Insights into the molecular mechanisms of uptake, phytohormone interactions and stress alleviation by silicon: a beneficial but non-essential nutrient for plants. **Plant Growth Regulation** https://doi.org/10.1007/s10725-023-01002-3

Teixeira GCM, de Mello Prado R, Rocha AMS, Oliveira Filho ASB, Sousa Junior GS, Gratão PL (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. **Scientific Reports** 12: 17487. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21680-9

Teixeira GCM, Prado RdM, Rocha AMS, Piccolo MdC (2020) Root- and foliar-applied silicon modifies C: N: P ratio and increases the nutritional efficiency of pre-sprouted sugarcane seedlings under water deficit. **PLoS ONE** 15: e0240847. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240847

Temiz CC, Téllez TLI, Velasco VJ, Merino GFC (2017) Efecto de los elementos benéficos Al, Co, Se Y Si em la nutricion de heliconias (*Heliconia* sp.). **Agroproductividad**, 10: 62-68.

Virk AL, Lin B-J, Kan Z-R, Qi J-Y, Dang YP, Lal R, Zhao X, Zhang H-L (2022) Simultaneous effects of legume cultivation on carbon and nitrogen accumulation in soil. **Advances in Agronomy** 171:75–110. https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2021.08.002

Wang L, Chen Y, Zhou Y, Xu Z, Tan B, You C, Zhang L, li H, Zheng H, Guo L, Wang L, Huang Y, Zhang J, Liu Y (2021) Environmental conditions and litter nutrients are key determinants of soluble C, N, and P release during litter mixture decomposition. **Soil and Tillage Research** 209:104928. https://doi.org/10.1016/J.STILL.2020.104928

Xu Z, Lai T, Li S, Si D, Zhang C, Cui Z, Chen X (2018) Promoting potassium allocation to stalk enhances stalk bending resistance of maize (*Zea mays* L.). **Field Crops Research** 215:200–206. https://doi.org/10.1016/J.FCR.2017.10.020

Yang L, Zhou J, Zamanian K, Zhang K, Zhao J, Zang H, Yang Y, Zeng Z (2022) Peanut straw application rate had a greater effect on decomposition and nitrogen, potassium and phosphorus release than irrigation. **Plant and Soil.** https://doi.org/10.1007/s11104-022-05614-y

Yang R, Dong J, Li C, Wang L, Quan Q, Liu J (2021) The decomposition process and nutrient release of invasive plant litter regulated by nutrient enrichment and water level change. **PLoS One** 16:e0250880. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0250880

Yang Z, Li X, He X, Liu Y (2021) Recovery of silicon and potassium from rice straw through thermal conversion and residue leaching. **Journal of Environmental Chemical Engineering** 2021:105057. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105057

Yoshida S (1965) Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute of Agricultural Sciences** Series B, 15, 1–58.

Zhang T, Luo Y, Chen HYH, Ruan H (2018) Responses of litter decomposition and nutrient release to N addition: A meta-analysis of terrestrial ecosystems. **Applied Soil Ecology** 128:35–42. https://doi.org/10.1016/J.APSOIL.2018.04.004

APÊNDICE



Apêndice A. Sacolas de decomposição com material vegetal da parte aérea de plantas de feijoeiro (1A) e sacolas de decomposição para os momentos 30, 60, 90 e 120 dias depositados no campo sobre restos culturais de feijoeiro (1B).