convibra
www.convibra.org

LIBERAÇÃO DE FERTILIZANTE POTÁSSICO RECOBERTO COM POLÍMERO

MOTA, E.P.[1]; SERAFIM, L.C.[2]; KAMOGAWA, M.Y.[3]; VITTI, G.C.[3]

[1]Professor Doutor em Ciências (Solos e Nutrição de Plantas); Faculdade de Ensino Superior Santa Bárbara (FAESB), prof.edson.mota@faesb.edu.br; [2] Estudante de graduação em Engenharia Agronômica, Faculdade de Ensino Superior Santa Bárbara (FAESB), leticiachristianeserafim@gmail.com; Professor Doutor em Química, Departamento de Ciências Exatas da Universidade de São Paulo (USP/ESALQ), kamogawa@usp.br [3]; Professor Doutor em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Departamento de Ciências do Solo da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), gcvitti@usp.br [3]

RESUMO

Dentre os desafios enfrentados na produção agrícola, um dos principais se direciona a busca de novos meios para que se alcancem maiores eficiências dos insumos, com destaque para os fertilizantes, uma vez que possuem grande importância entre os fatores de produção. A linha de pesquisa dos fertilizantes com tecnologias agregadas surge como uma das alternativas possíveis, sendo o recobrimento físico dos grânulos do fertilizante uma opção relevante a ser estudada. O objetivo foi estudar a dinâmica de liberação de fertilizante potássico de liberação controlada (revestido), verificando a influência de porcentagens de recobrimento aplicadas ao fertilizante e seus reflexos no tempo necessário à liberação. Experimentos idênticos foram conduzidos em ambiente controlado (laboratório) e casa de vegetação. Foram utilizadas 5 porcentagens de polímero de poliuretano para o recobrimento do cloreto de potássio (KCl) e, um tratamento sem recobrimento. Utilizando bolsas porosas, confeccionadas com telas permeáveis, alocaram-se os fertilizantes e estes foram enterrados em vasos contendo 1 kg de um Latossolo Vermelho-amarelo. Semanalmente, coletas das bolsas porosas contendo o fertilizante foram realizadas e encaminhou-se o material à análise química. Os resultados, analisados por teste de comparação de médias (Duncan a 5% de significância) ao final do experimento, mostraram que recobrimentos superiores a 6,75% (m/m) atrasam a liberação do KCl para o solo e, na medida em que se aumenta a porcentagem de recobrimento, diminui-se a liberação, independentemente do local de alocação do fertilizante. Assim a proteção física pode ser considerada como alternativa ao aprimoramento do uso desse insumo.

Palavras-chave: cloreto de potássio; poliuretano; liberação controlada; curva de liberação.

INTRODUÇÃO

O aumento populacional resulta na necessidade do aumento da produção de alimentos, fibras e energia, consequentemente, cresce a demanda dos produtos agrícolas, os quais, para sua produção, necessitam do aporte nutricional fornecido pelos fertilizantes.

Uma vez destacado que estes insumos são de vital importância para o bom desenvolvimento das atividades agrícolas, torna-se fundamental o desenvolvimento de alternativas que otimizem o uso dos insumos disponíveis, evitando as perdas e facilitando ou possibilitando o desenvolvimento de novas estratégias de manejo por parte do produtor, resultando em possíveis melhorias no sistema de produção.

O potássio, em termos gerais, figura como o segundo macronutriente em teor contido nas plantas, elencado como o terceiro elemento com maior probabilidade de limitar o crescimento das plantas (Furlanetto et al., 2018). É, depois do fósforo, o nutriente mais consumido como fertilizante pela agricultura brasileira (Raij, 1991; ANDA, 2018).

Na planta, possui as funções principais de osmoregulação, ativador enzimático, processos respiratórios, atuação na fotossíntese e, considerado como um dos nutrientes diretamente relacionado a qualidade dos produtos agrícolas produzidos (Taiz e Zeiger, 2009). Em sua ausência, pode apresentar sintomatologia visual de clorose generalizada, geralmente atingindo os bordos das folhas e com evolução para necrose dos tecidos vegetais, iniciando os sintomas pela porção inferior das plantas (Malavolta, 2006; Taiz e Zeiger, 2009).

Segundo Troeh e Thompson (2007), as plantas absorvem grandes quantidades de potássio, todo ele na forma de íons K^+. Ernani et al. (2007), expõem que esses fertilizantes são originados da moagem das rochas provenientes de depósitos formados pela evaporação de antigos mares e lagos. Em nível de importância, destaca-se o cloreto de potássio, mais utilizado no mundo entre os fertilizantes potássicos, devido ao seu preço, com menor custo por unidade de K, mesmo em condições da alta volatilidade de preços dos ultimos dois anos (2020 e 2021) (Global Fert, 2021; Osaki, 2021). Porém, o potássio é um recurso finito, sem substituto como nutriente às plantas e, os depósitos desse mineral encontram-se localizados em alguns poucos países, destacando-se Bielorrússia, Canadá, Russia e Estados Unidos da América (USGS, 2009; ANM, 2014).

O Brasil importa praticamente todo o potássio que utiliza tornando delicada a situação estratégica do país, valores superiores a 90% podem ilustrar a dependência brasileira por este insumo (ANM, 2014; Silva et al., 2018).

Neste contexto, estratégias que aumentem a eficiência desse fertilizante possuem importante papel técnico e estratégico no cenário mundial. Tecnologias como o recobrimento dos fertilizantes, para retardar a solubilização ou controlar a liberação, têm sido adotadas por diversos países, com projeções de consumo de mercado em 7,5 milhões de toneladas (Trenkel, 2010; Guelfi, 2017). O recobrimento dos grânulos pode ser realizado com o uso de ceras, látex, polímeros ou outras (Vitti e Heirinchs, 2007), de forma a proteção física do insumo.

Os fertilizantes recobertos, enquadrados como controlados, são produtos que liberam o fertilizante de forma mais lenta para o ambiente, com fatores de taxa de liberação, padrão e tempo conhecidos e melhor controláveis no processo de produção (Shaviv, 2005; Blaylock, 2007). A liberação controlada possui, além da vantagem técnica de liberação mais lenta que os fertilizantes tradicionais e melhor controle e planejamento de uso do insumo, vantagem ambiental, possibilitando incremento na eficiência de uso e evitando contaminações ao meio ambiente (Shaviv, 2001).

Fertilizantes recobertos com polímeros podem ser adquiridos no comércio, entretanto a dinâmica destes em solo ainda não é totalmente conhecida, neste contexto, o objetivo foi estudar a dinâmica de liberação de fertilizantes potássicos de liberação controlada, verificando a influência de diferentes porcentagens de recobrimento aplicados ao fertilizante e seus reflexos no tempo necessário à liberação.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em ambiente controlado (25°C) e, simultaneamente, em casa de vegetação, utilizando um Latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa, tendo como características químicas e texturais: pH($CaCl_2$) = 5,6; M.O = 2,3 g dm^{-3}; P = 68 mg dm^{-3}; K = 2,1 mmolc dm^{-3}; Ca = 72 mmolc dm^{-3}; Mg = 34 mmolc dm^{-3}; H+Al = 28 mmolc dm^{-3}; CTC = 135 mmolc dm^{-3}; V% = 79; teor de areia = 533 g kg^{-1}; teor de silte = 83 g kg^{-1}; teor de argila = 383 g kg^{-1}. Foram utilizados vasos com capacidade para 1 kg de solo, mantidos a 80% da capacidade de campo.

O delineamento experimental foi de blocos casualizados (DBC) com três repetições, salienta-se que o experimento foi elaborado desenvolvendo-se sistema de análise destrutiva das amostras, então, uma mesma unidade amostral foi composta de quatro unidades de observação, compondo o tratamento. Este sistema, além de permitir a análise da quantidade de fertilizante liberado, possibilitou traçar a curva de liberação dos tratamentos no tempo, ou seja, foi observada a tendência, velocidade e intensidade de liberação do interior dos tratamentos recobertos para o solo.

Em cada vaso, foi enterrada uma bolsa porosa, produzida com o uso de tela de poliéster de 18 fios e malha 40, com dimensões de 6 x 6 cm, contendo cinco gramas de cloreto de potássio (KCl) recoberto com polímero de poliuretano em diferentes porcentagens de recobrimento, constituindo cinco tratamentos: KCl + 5,05% de polímero (K1), KCl + 5,90% de polímero (K2), KCl + 6,75% de polímero (K3), KCl + 8,45% de polímero (K4), KCl + 9,30% de polímero (K5) e; utilizou-se também um tratamento sem recobrimento. Ressalta-se que o processo de aplicação do polímero sobre o fertilizante foi realizado por aspersão com subsequente período de secagem e cura do produto aplicado, sendo este processo de aspersão realizado mais vezes, conforme a necessidade de aumento da espessura da cápsula de recobrimento dos tratamentos aplicados.

Semanalmente foram realizadas coletas das bolsas porosas em ambos os ambientes (laboratório e casa de vegetação), sendo estas levadas ao laboratório. Após a retirada do fertilizante residual das bolsas porosas, o material foi tratado com 2 mL de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4 18M), sendo deixado em repouso por 30 minutos para ação do ácido e para a dissolução do recobrimento expondo, assim, o fertilizante. Após essa etapa, adicionou-se 25 mL de água destilada e aqueceu-se o material, em bloco digestor, por 45 minutos a 150°C, solubilizando KCl.

A partir do extrato obtido, este foi filtrado em filtro Whatman n°42 e o volume resultante foi completado para 50 mL e armazenado em frasco de polipropileno (falcon) com capacidade para 50 mL. Devido a sua concentração, o extrato obtido foi diluído e analisado em Espectrofotômetro de chama, utilizando padrão de K de 10 ppm para calibração.

A partir dos resultados obtidos, foi estimado o tempo de liberação do fertilizante, ou seja, o período necessário para disponibilização de todo o conteúdo da cápsula de recobrimento. Os resultados foram submetidos ao teste F ($p \leq 0,05$) para a constatação da ocorrência de diferenças entre os tratamentos e, em caso significância, aplicou-se o teste de Duncan a 5% de probabilidade, utilizando o programa SAS (versão 9.2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras coletadas ao término da primeira semana (7 dias após instalação – DAI) não apresentaram diferenças significativas entre o ambiente controlado e a casa de vegetação.

Analisando os dados de liberação, 90% do KCl foi solubilizado, restando traços de sua presença nas bolsas porosas. Os produtos K1 e K2 haviam liberado 75 a 80% do potássio. Os produtos K3, K4 e K5 tiveram uma liberação de aproximadamente 67%, 42% e 33% de K, respectivamente (Figura 1).

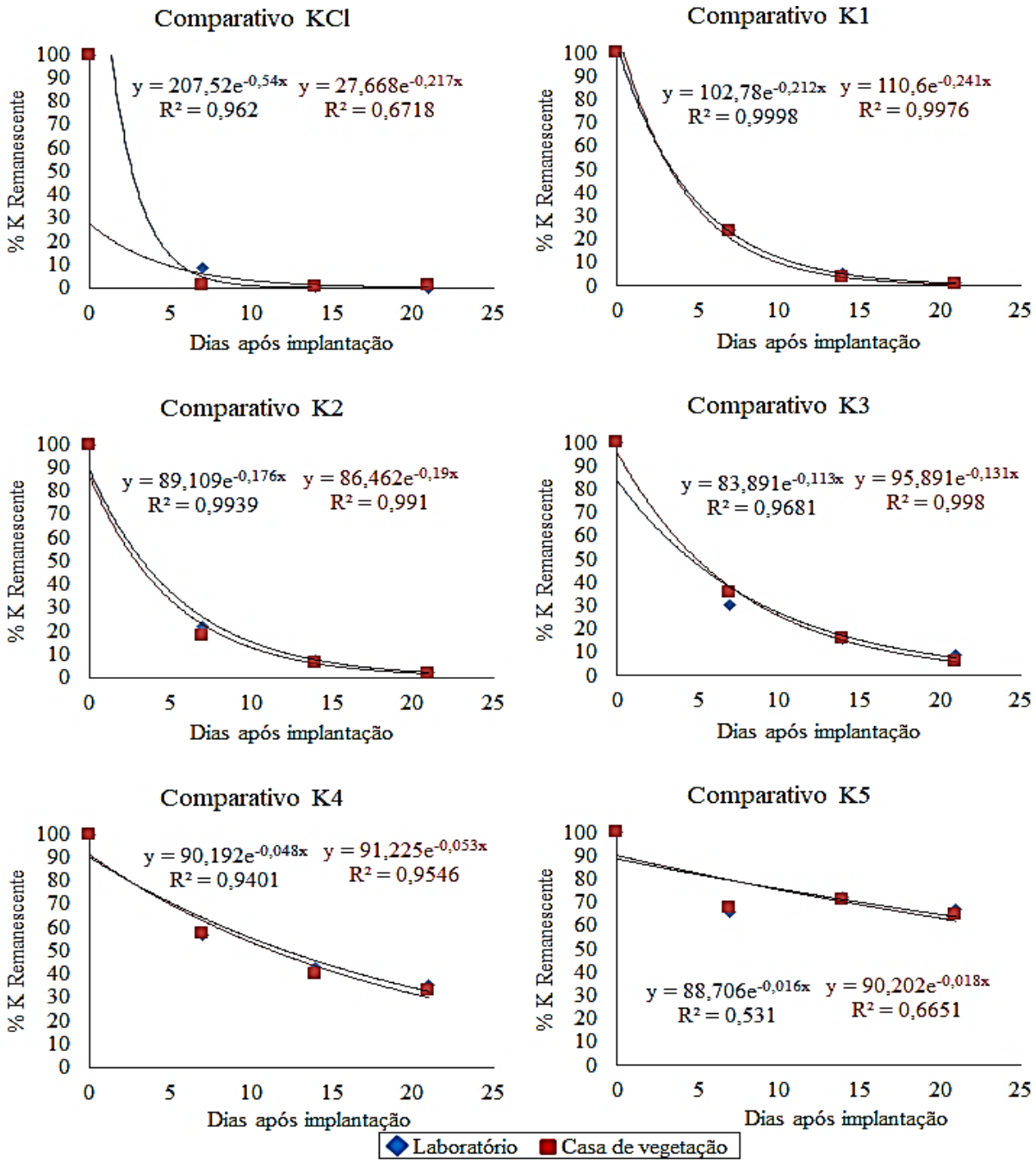

Figura 1. Dinâmica de liberação dos tratamentos com e sem recobrimento durante o período de avaliação do experimento

Observou-se que, nas semanas subsequentes, ocorreu redução na velocidade de material liberado em todos os tratamentos e ambientes, observados pela menor inclinação da curva de liberação.

Ao fim dos 14 DAI o tratamento controle já se encontrava praticamente esgotado, com mais de 99% de K liberado, dinâmica semelhante foi encontrada para os produtos K1 e K2, com teor acumulado médio de 94%. Os produtos K3, K4 e K5 tiveram liberações de 84%, 60% e 30% de K, respectivamente (Figura 1).

Analisando o total de nutriente liberado no período, 21 DAI, concluímos que os produtos K1 e K2 não se diferenciaram, a 95% de confiança, do tratamento controle. O produto K3, apresentou redução da liberação, tanto semanalmente como de forma acumulada, chegando ao final do ensaio com cerca de 94% de liberação, entretanto este produto demostrou desempenho inferior aos tratamentos K4 e K5. O produto K4, resultou em total final acumulado por volta de 65% de liberação e K5 de 35%, este último com o melhor desempenho, entretanto ao considerar a porcentagem de recobrimento, observou-se quantidade significativa de polímero aplicado 9,30% (relação massa/massa - m/m) (Tabela 1) (Figura 1).

Tabela 1. Porcentagens de liberação dos fertilizantes recobertos ao final do experimento

Tratamento	Polímero	Liberação AC[(1)]*	Liberação CV[(2)]*
	----------%----------		
KCl	0,00	100,0 a	99,2 a
K1	5,05	98,8 a	99,3 a
K2	5,90	97,6 a	98,3 a
K3	6,75	91,1 b	93,9 b
K4	8,45	64,6 c	67,2 c
K5	9,30	32,7 d	35,0 d

Ambientes de realização dos experimentos: [(1)]AC = ambiente controlado (25°C); [(2)] CV = casa de vegetação;
* médias seguidas de mesma letra, minúsculas, na coluna (dentro de cada ambiente) não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p<0,05$).

A liberação dos tratamentos nos experimentos em casa de vegetação e no ambiente controlado não diferenciam significativamente, levando a inferir que os parâmetros ambientais temperatura e umidade do ar, não foram determinantes para a solubilização dos fertilizantes. Desta forma, o fator preponderante na solubilização, assim, foi a umidade do solo, responsável pela hidratação, solubilização e rompimento da cápsula polimérica e, consequentemente, liberação do fertilizante, como já consolidado desde Trenkel (1997).

Cabe citar que até 6,75% de polímero, o que engloba os produtos K1, K2 e K3, a maioria das cápsulas poliméricas de recobrimento encontravam-se totalmente rompidas no momento do preparo das amostras, o que reflete a perda da proteção física e o padrão de liberação encontrado, o que não ocorreu com os produtos K4 e K5, onde a porcentagem de polímeros foi de, no mínimo, 8,45% (m/m) (Figura 1).

Ao observar o padrão de liberação dos tratamentos, foi observado que a saída do KCl das cápsulas de recobrimento apresentou dinâmica exponencial, ou seja, maior porção do fertilizante foi liberada já na primeira coleta do experimento.

Os tratamentos K1, K2 e K3 tiveram valores superiores a 60% de liberação na primeira coleta realizada e, embora os tratamentos K4 e K5 tenham apresentado liberação mais controlada do KCl, com valores inferiores a 40% do total liberado, o padrão de liberação melhor ajustado a curva obtida, também foi o exponencial (Figura 1).

O padrão de liberação exponencial permitiu que fosse estimado o período total para liberação das cápsulas. A estimativa foi realizada por meio do cálculo de liberação percentual, denominado Velocidade média (Vm), caracterizada por um índice que utilizou os dados da média de todos os valores de liberação e seus desvios padrão, assim verificando o percentual diário de liberação e o tempo necessário para disponibilização de 100% do KCL (Tabela 2).

Tabela 2. Estimativas dos dias necessários para liberação total do fertilizante de dentro das cápsulas de recobrimento para o solo

Tratamento	Número de dias		
(Laboratório - AC)	Limite superior		Limite inferior
KCl	28,1	--------	27,9
K 1	28,6	--------	28,3
K 2	29,2	--------	28,6
K 3	34,2	--------	29,7
K 4	55,2	--------	51,0
K 5	365,8	--------	216,0
Tratamento	Número de dias		
(Casa de vegetação - CV)	Limite superior		Limite inferior
KCl	28,3	--------	28,3
K 1	28,4	--------	28,1
K 2	29,3	--------	28,1
K 3	31,3	--------	29,7
K 4	55,8	--------	44,9
K 5	256,5	--------	177,5

Calculou-se a média aritmética dos tratamentos e, então, utilizou-se a média de um tratamento para subtrair a média de um tratamento subsequente, por exemplo, média da coleta 2 subtraída da média da coleta 1, para todos os momentos de coleta. O valor obtido foi dividido pela subtração dos DAI das coletas, na mesma ordem utilizada para as médias (DAI coleta 2 subtraída do DAI coleta 1). Este mesmo procedimento de cálculo foi realizado para o desvio padrão obtido dos tratamentos e, para calcular a Vm diária, dividiu-se o valor de 100% pela somatória de todos os cálculos de médias e desvios padrão (Eq. 1 a 7).

$$\text{Média tratamento (por coleta)} = \frac{\sum \text{Tratamento}}{\text{número de tratamentos}} \quad [1]$$

$$\frac{\Delta\text{Média dos tratamentos}}{\Delta\text{Dias}} = \frac{\text{Média tratamento coleta 1 - Média tratamento da coleta 2}}{\text{Dias coleta 1 - Dias da coleta 2}} \quad [2]$$

$$\text{Média desvios padrão dos tratamentos (por coleta)} = \frac{\sum \text{Desvios padrão dos tratamentos}}{\text{número de desvios padrão dos tratamentos}} \quad [3]$$

$$\frac{\Delta\text{Média desv. pad. dos tratamentos}}{\Delta\text{Dias}} = \frac{\text{Média desv. pad dos tratamentos coleta 1-Média desv. pad dos tratamentos coleta 2}}{\text{Dias coleta 1 - Dias da coleta 2}} \quad [4]$$

$$\text{Média geral dos tratamentos} = \frac{\sum \frac{\Delta\text{Média dos tratamentos}}{\Delta\text{Dias}}}{\text{número total de coletas realizadas}} \quad [5]$$

$$\text{Média geral dos desv. pad dos tratamentos} = \frac{\sum \frac{\Delta\text{Média dos desv. pad dos tratamentos}}{\Delta\text{Dias}}}{\text{número total de coletas realizadas}} \quad [6]$$

$$\text{Velocidade média } (Vm) = \frac{-100}{(\text{Média geral dos tratamentos} \pm \text{Média geral dos desv. pad dos tratamentos}} \quad [7]$$

A estimativa dos dias de liberação permitiu estimar faixa de liberação entre 28 a 35 dias para os tratamentos K1, K2 e K3, para ambos ambientes dos experimentos (Tabela 2). O tratamento K4 estimou-se faixa de 45 a 56 dias para liberação e, para o tratamento K5, entre 177 e 365 dias para liberação de 100% do fertilizante (Tabela 2).

É importante ressaltar que os maiores valores atingidos pelas estimativas se deveram a dinâmica exponencial de liberação, desta forma, a maior parte do fertilizante foi liberado logo aos primeiros dias do experimento, sendo uma pequena porção residual liberada nos últimos dias da faixa estimada (Figura 1). Este ponto é fundamental para que se possa entender a dinâmica obtida e realizar o planejamento da adubação.

A partir das porcentagens de recobrimento aplicadas ao tratamento K4 (8,45%), a maioria das cápsulas encontrava-se inteira, túrgida e sem danos aparentes. Estes resultados evidenciam que, em fertilizantes com porcentagens menores do polímero, a entrada de água na cápsula polimérica de recobrimento, solubilizando o produto por meio de um possível efeito osmótico, foi acentuada de forma a pressionar internamente o recobrimento e, assim, romper a cápsula, expondo o fertilizante em seu interior (Figuras 2 e 3).

Ao considerar o recobrimento como barreira física de proteção e controle da liberação, a insuficiência da cobertura do fertilizante, assim como fissuras ou não homogeneidade no recobrimento, pode levar a este tipo de rompimento e, então, ao expor o KCl (solúvel em água), resultou em liberação acelerada e intensificada do fertilizante (Trenkel, 1997; Bognola, 2014).

Os grânulos de KCl, apresentam variação em seu tamanho de partícula (0,8 a 3,4mm de diâmetro), quanto menor a partícula, maior a área de permeação de água, com superfície rugosa com arestas e pontos agudos, elevada porosidade e, baixa resistência a abrasão, tornando o revestimento uma melhoria em sua propriedade mecânica (Nascimento, 2014). Porém, frente a estes aspectos morfológicos, uma vez rompido o revestimento, tem-se acelerada liberação do KCl.

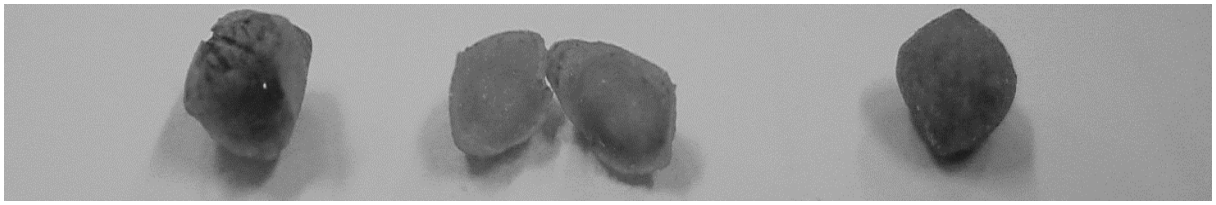

Figura 2. Exemplo de amostras do fertilizante ao final do experimento, após liberação do KCl (recobrimentos mais finos – 5,05%, 5,90% e 6,75%)

Figura 3. Exemplo de amostras do fertilizante ao final do experimento, após liberação do KCl (recobrimentos mais espessos – 8,45% e 9,30%)

Ao considerar o fertilizante em estudo, um insumo que apresenta grande heterogeneidade dos grânulos, elevado número de arestas e pontos agudos em sua morfologia, a possibilidade de desuniformidade no recobrimento pôde ter sido maior, ocorrendo o mencionado rompimento da cápsula (Figura 2). Portanto, tal morfologia do grânulo do fertilizante necessitou de membrana de revestimento mais rígida e, não havendo rompimento, houve a conservação do fertilizante no interior dos grânulos, o que tornou a liberação mais controlada e com maior longevidade (tempo de liberação) (Figura 3). É necessário maior contato dos profissionais de engenharia de materiais com os profissionais da engenharia agronômica e, a utilização de métodos microscópicos para melhor visualização da dinâmica das cápsulas podendo aumentar o entendimento da liberação e a eficiência do processo de recobrimento, uma vez que por se tratar de proteção física, falhas ou rachaduras comprometem o conceito da tecnologia.

Por fim mais estudos são necessários, uma vez que a literatura tem investigado os aspectos de reflexos na produtividade da aplicação dos produtos recobertos, mas estudos como o apresentado não vêm sendo desenvolvidos, mesmo sendo de fundamental importância para o conhecimento e utilização das tecnologias que surgem a cada dia no mercado.

CONCLUSÕES

O recobrimento físico do fertilizante utilizando o polímero de poliuretano, a partir de 6,75% diminuiu a liberação do adubo, no tempo e, na medida em que se aumenta a porcentagem de recobrimento, tanto em casa de vegetação como em ambiente controlado, diminui-se a liberação.

A liberação do fertilizante atendeu dinâmica exponencial, com maior porção do fertilizante liberado em maior intensidade e velocidade ao início do processo de disponibilização e, pequena liberação ao final da estimativa de liberação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. **POTÁSSIO. DPNM - Sumario mundial 2014**, 2014. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/potassio-sumario-mineral-2014. Acesso em: 6 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS - ANDA. **Estatísticas.** Disponível em: http://anda.org.br. Acesso em: 03 abr. 2020.

BLAYLOCK, A. Novos fertilizantes nitrogenados: o futuro dos fertilizantes nitrogenados de liberação controlada. **Informações agronômicas**, v. 120, p. 8–10, 2007.

BOGNOLA, I.A.; **Padrão de solubilização do fertilizante cloreto de potássio encapsulado em gel celulósico e polímero biodegradável pela EMBRAPA**. 3º Encontro Brasileiro de Silvicultura, 2014. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1003190/1/encontrosilvicultura2014pag330.pdf. Acesso em: 29 mar. 2020.

ERNANI, P. R.; ALMEIDA, J. A.; SANTOS, F. C. Potássio. In: NOVAIS, R.F et al. (ed). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 9 p. 551 – 594.

FURLANETTO, R.H; NANNI, M.R; CRUSIOL, L.G.T.; **Índices de vegetação obtido por sensor hiperespectral terrestre na identificação da deficiência de potássio na cultura da soja.** VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA. Goiânia. n. 820, 2018. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1093762/1/p.820822CBSoja2018.pdf. Acesso em: 1 abr. 2020.

GLOBAL FERT. Preços de Cloreto de Potássio seguem em ascensão. Disponível em: https://globalfert.com.br/analises/precos-de-cloreto-de-potassio-seguem-em-ascensao/. Acesso em: 10 set. 2021.

GUELFI, D.; Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações agronômicas**, v. 157, p. 1-14 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316281491_Fertilizantes_nitrogenados_estabilizados_de_liberacao_lenta_ou_controlada. Acesso em: 8 abr. 2020

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 639 p

NASCIMENTO, C.O. Avaliação de revestimentos de polímeros biodegraáveis em grânulos de KCl obtidos por meio de leito fluidizado. **Dissertação** apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Industrial, PEI, da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial, Salvador-BA. 2014.

OSAKI. M. Alta do preço de fertilizante desafia o produtor. **CEPEA**. 2021

RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991.

SHAVIV, A. Advances in controlled-release fertilizers. **Advances in Agronomy**, v. 71, p. 1-49, 2001.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: **IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS**, 2005, Frankfurt. Proceedings… Paris: International Fertilizer Industry Association, 2005. p. 1-15.

SILVA, R.R; CARVALHO, I.S.B; ROSA, S.D.F.; Transformações químicas e mineralógicas em mistura de rocha potássica e calcário submetida a processo térmico visando a liberação do potássio contido. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, **Tecnol. Metal. Mater. Miner**. v. 15, n. 4, p. 369-376, 2018. Disponível em: https://www.tecnologiammm.com.br/article/10.4322/2176-1523.20181473/pdf/tmm-15-4-369.pdf. Acesso em: 7 abr. 2020.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal. 4 ed**. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819 p.

TRENKEL, M.E. Improving fertilizer use efficiency. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. Paris: **International Fertilizer Industry Association**, 1997. 151 p.

TRENKEL, M.E. Slow and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: **International Fertilizer Industry Association**, 2010. 167 p.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo. 6 ed**. São Paulo: Andrei, 2007.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **Mineral Commodity Summaries, January 2009**. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2009/mcs2009.pdf. Acesso em: 24 mai. 2012.

VITTI, G.C.; HEIRINCHS, R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: Uma visão holística. In: YAMADA,T; ABDALLA, S.R.S.; VITTI,G.C. (ed). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI Brasil, 2007, cap. 4 p. 109 – 160.