



Caracterização e estudo cinético da liberação de fósforo de fertilizante organomineral peletizado à base de resíduos agroindustriais

Brenda F. Silva(PG)^{1*}, Maria Fernanda Bertão de Araujo Lamin (IC)¹, Marcos V. Ferreira(PQ)¹, Henrique de A. Sobreira(PQ)², Anizio M. de Faria (PQ)¹, Rosana M. N. de Assunção(PQ)¹

¹ Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, MG, Brasil, 38400-902.

² Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM), Campus Ituiutaba, MG, Brasil, 38300-970.

e-mail: brendafagundes@ufu.br; rosana.assuncao@ufu.br

RESUMO

RESUMO - Este estudo apresenta a caracterização físico-química e a avaliação da liberação de fósforo de um fertilizante organomineral peletizado (FOM), obtido da compostagem de resíduos agroindustriais de papel e celulose de aterro sanitário com fosfato monoamônico (MAP). As análises espectroscópicas indicaram sinais de fósforo e bandas de matéria orgânica lignocelulósica. Após 24 h em água, a área superficial específica do FOM aumentou para 13,1560 m²·g⁻¹, inferior ao do MAP, indicando que a matriz orgânica diminui a exposição da superfície mineral. O estudo de liberação de fósforo demonstrou um comportamento mais gradual para o FOM, com retardamento nas primeiras 6 h, evidenciando a ação da fração orgânica na proteção mineral. Entre os modelos cinéticos avaliados, o modelo de Weibull apresentou melhor ajuste ($R^2 = 0,99$), indicando difusão pseudo-Fickiana. Esses resultados apontam o potencial do FOM como insumo agrícola eficiente e sustentável.

Palavras-chave: Fertilizante organomineral; Resíduos Agroindustriais; Liberação de fósforo, Modelagem Cinética.

Introdução

Fertilizantes organominerais têm se consolidado como alternativas promissoras na agricultura moderna, por aliarem os benefícios nutricionais dos fertilizantes minerais à capacidade condicionadora da matéria orgânica^[1]. A incorporação de fertilizantes minerais e matéria orgânica proveniente da compostagem de resíduos agroindustriais tem ganhado destaque como estratégia de valorização de resíduos sólidos e redução de impacto ambiental. Estudos demonstram que fertilizantes organominerais são eficazes mesmo em menores doses, mantendo a produtividade das culturas, e favorecendo o desenvolvimento vegetativo, acúmulo de biomassa e minimizando perdas por lixiviação^[1,2]. Essas evidências reforçam o potencial dessa classe de fertilizantes como ferramenta para a agricultura sustentável, com foco na eficiência agrônômica e no reaproveitamento de recursos. Nesse contexto, a compreensão da dinâmica dos fertilizantes organominerais é essencial para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis, que podem contribuir para a redução de perdas de nutrientes, o aprimoramento da eficiência de uso dos fertilizantes e a melhoria da qualidade e saúde do solo.

Este estudo apresenta a caracterização e a investigação do perfil de liberação de fosfato de um fertilizante organomineral peletizado (FOM), desenvolvido por meio da combinação de resíduos agroindustriais compostados com fosfato monoamônico (MAP), sendo o MAP um fertilizante mineral solúvel, amplamente empregado como fonte de fósforo e nitrogênio na agricultura.

Experimental

O FOM foi obtido a partir da compostagem de resíduos de papel e celulose de aterro sanitário, seguida da mistura com fosfato monoamônico (MAP) e posterior peletização, resultando em grânulos homogêneos com composição final de 6 % (p/p) N, 30 % (p/p) P e mínimo de 8 % (p/p) C total. Para fins de comparação, foi também examinado um fertilizante mineral de fosfato monoamônico (MAP), que possui 9 % (p/p) de N e 48 % (p/p) de P.

Caracterizações

O FOM e o MAP foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho (IV), em estado sólido, com cristal de diamante, na faixa de 4000 a 650 cm⁻¹, resolução de 4 cm⁻¹ e 128 varreduras. A área superficial específica foi determinada pelo método BET, enquanto o volume total de poros e o diâmetro médio dos poros foram obtidos pela análise da isoterma de adsorção/dessorção de N₂ a -195,5 °C, após pré-tratamento a 100 °C sob vácuo para remoção de gases adsorvidos.

Liberação de fosfato

Para o estudo de liberação em água de fosfato na amostra de fertilizante organomineral peletizado, utilizou-se o protocolo MAPA. O fósforo liberado foi quantificado por espectrofotometria, utilizando o método do ácido molibdovanadofosfórico. As alíquotas foram retiradas em intervalos regulares ao longo de 24 h.^[3]

Modelos cinéticos

As curvas de liberação de fósforo foram analisadas com base em três modelos cinéticos: Higuchi, Korsmeyer-Peppas e Weibull. O ajuste dos dados foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), sendo considerado o modelo mais adequado aquele que apresentou o maior valor de R^2 .^[4]

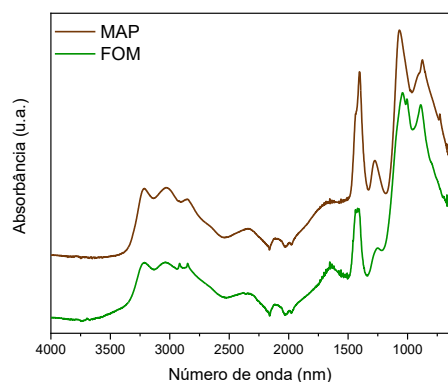


Resultados e Discussão

Espectroscopia no Infravermelho - IV

A análise dos espectros de infravermelho (Figura 1) revelou que tanto o MAP quanto o FOM apresentaram perfis espectrais semelhantes, com sinais de fósforo em 1250 cm^{-1} , associados à ligação $\text{P}=\text{O}$, conforme esperado pela presença de MAP na formulação do FOM. No entanto, algumas diferenças foram observadas no espectro do FOM, destacando-se bandas atribuídas à matéria orgânica oriunda dos resíduos lignocelulósicos, como a banda em 1632 cm^{-1} pode ser associada ao estiramento $\text{C}=\text{C}$ de estruturas aromáticas, e um ombro em 1042 cm^{-1} , correspondente ao estiramento da ligação $\text{C}-\text{O}$.

Figura 1. Espectros de absorção na região do infravermelho do MAP e FOM.



Análise de Área Superficial Específica e Porosidade

A técnica de adsorção de N_2 foi utilizada para avaliar as propriedades estruturais dos grânulos de fertilizante organomineral antes e após os testes de liberação de fosfato em água (Tabela 1). Os resultados indicaram que o FOM antes da imersão (FOM 0 h), apresentou baixa área superficial específica ($0,6584\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), semelhante ao reportado para o MAP ($0,3530\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)^[3]. Após 24 h em água (FOM 24 h), observou-se um aumento na área superficial ($13,1560\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$), embora menos expressivo que no MAP ($77,4401\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$). Esse resultado sugere que a matriz orgânica do FOM atua como um moderador da exposição superficial, limitando a expansão da porosidade.

Tabela 1. Valores de área superficial específica e porosidade obtidos pela técnica de adsorção/dessorção de N_2 .

Amostra	Área superficial específica ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	Volume total de poros ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)	Diâmetro médio dos poros (nm)
FOM 0 h	0,6584	0,006967	41,9970
FOM 24 h	13,1560	0,052846	16,0676
MAP 0 h	0,3530	0,000875	9,9196
MAP 24 h	77,4401	0,280133	11,5160

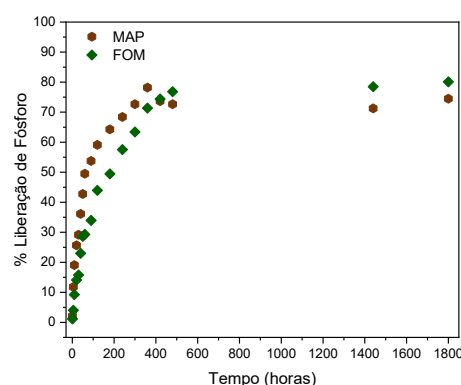
Esse comportamento é vantajoso, pois favorece a liberação gradual dos nutrientes, além de promover uma melhor interação do fertilizante com o solo, promovendo uma disponibilização mais

eficiente e sustentada do fósforo.

Estudo da Liberação de Fósforo

As curvas de liberação de fósforo ao longo de 24 h (Figura 2) demonstraram que o FOM apresentou comportamento semelhante ao do MAP, porém com retardamento nas primeiras 6 horas, indicando uma liberação mais gradual do nutriente. Esse comportamento sugere que a fração orgânica protegeu a fração mineral, favorecendo uma liberação controlada e minimizando perdas por lixiviação, corroborando os dados de área superficial específica.

Figura 2. Curvas de porcentagem de liberação (% Liberação) de fósforo para as amostras de MAP e FOM.



Modelos Cinéticos

Entre os modelos cinéticos avaliados, o modelo de Weibull foi o que melhor descreveu o comportamento de liberação do fósforo ($R^2 = 0,99$), sugerindo um mecanismo de difusão pseudo-Fickiano. Por outro lado, os modelos de Higuchi ($R^2 = 0,69$) e Korsmeyer-Peppas ($R^2 = 0,87$) apresentaram valores de R^2 inferiores, confirmando o modelo de Weibull.

Conclusões

A incorporação de resíduos agroindustriais compostados na formulação do fertilizante organomineral peletizado resultou em melhorias estruturais e em uma liberação mais gradual de fósforo, com destaque para o ajuste ao modelo de Weibull. Esses resultados corroboram o potencial do FOM como alternativa eficiente e sustentável para a agricultura.

Agradecimentos

CNPQ; FAPEMIG; FINEP (01.11.0135.00/01.13.0371.00); UFU; PROAP;

Referências

1. C. A. C. Crusciol; M. Campos; J. M. Martello; C. J. Alves; C. A. C. Nascimento; J. C. R. Pereira; H. Cantarella, Sci. Rep. 2020, 10, 5398. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62315-1>.
2. H. A. Sobreira; M. V. Ferreira; A. M. Faria; R. M. N. Assunção, Ind. Crops Prod. 2024, 222 (Pt. 3), 119816. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119816>.
3. BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília: MAPA, 2017.
4. M. Papadopoulos; K. Kosmidis; P. Vlachou; P. Macheras, Int. J. Pharm. 2001, 232 (1–2), 55–61. [https://doi.org/10.1016/S0928-0987\(01\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0928-0987(01)00095-1).