

Fertilizante organomineral fosfatado a base de casca de banana e borra de café

Phosphate organomineral fertilizer based on banana peel and waste coffee ground

Gustavo Fernandes Teixeira¹; Kássia Graciele Santos²

¹Aluno do curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3743-063X>. E-mail: gustavo_azaz@hotmail.com

²Professora do curso de Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7452-6900>
E-mail: kassia.santos@uftm.edu.br

RESUMO: Com o grande crescimento populacional, a agricultura precisa de uma maior eficiência cada vez mais e como forma de otimizar a produção, o uso de fertilizantes se tornou necessário. Para um melhor aproveitamento do fertilizante no solo, com o intuito de diminuir suas perdas, este trabalho propõe a produção de um fertilizante organomineral de liberação lenta a partir do superfosfato triplo. A partir disso, realizar análises de liberação e melhoramento em seu desempenho com pirólise, criando o biochar, e recobrimento com polímero. A criação dos fertilizantes foi realizada por extrusão manual, em que causou uma heterogeneidade nos pellets. A amostra F15 (9,2% de casca de banana, 1,6% de amido, 57,3% de TSP e 32% de borra de café) apresentou maior tempo de liberação (1h para liberar 50% dos nutrientes e 8h para liberação total). A partir desta amostra realizou-se um melhoramento com um recobrimento polimérico e tratamento térmico. Ambos os testes apresentaram um bom resultado, porém no tratamento térmico ocorreu perdas de fertilizante devido as reações indesejadas. O modelo cinético de Weibull foi o que mais se adequou para as análises de liberação. A obtenção de fertilizantes organominerais peletizados e submetidos a tratamento térmico é promissora, pois além da economia da fração mineral proporciona também um ganho ambiental devido ao reaproveitamento de resíduos que seriam descartados.

Palavras-chave: fertilizante fosfatado, liberação lenta, tratamento térmico, extrusão.

ABSTRACT: Population growth impacts all areas of society. Food production is one of the most pressing challenges resulting from population growth creating the need for optimized production and the application of innovative ideas in the agricultural sector to meet growing demands. A common method used to increase crop yields is the application of fertilizers. Aiming to reduce the impact of fertilizer application, specifically soil leaching, this study proposes the production of a slow-release organomineral fertilizer made from triple superphosphate. The proposed fertilizer was created via hand extrusion ensuring heterogeneity in the resulting fertilizer pellets. The sample F15 (9,2% of banana peel; 1,6% of starch; 57,3% of TSP and 32% of coffee waste) showed the slow-release time (1h for the release of 50% of the nutrients and 8h for the total release). Tests were then conducted seeking to analyze and improve their pyrolysis performance, biochar creation potential, and polymer coating in the soil. Test results enabled improvements to the fertilizer pellets via polymeric coating and thermal treatment. Both methods displayed good results, however, the thermal treatment method resulted in fertilizer loss due to unwanted reactions. Test results were analyzed using Weibull's kinetic model, which after great consideration, was deemed the most appropriate to analyze the properties of the proposed fertilizer. The development of pelleted and heat-treated organomineral fertilizers is promising because, in addition to saving the mineral fraction, it also provides an environmental benefit by reusing waste that would otherwise be thrown.

Keywords: phosphate fertilizer, slow release, thermal treatment, extrusion.

INTRODUÇÃO

O aumento populacional possibilitou a criação de grandes centros urbanos e desenvolvimento de tecnologias ao longo da história. Neste contexto, atrelado ao avanço populacional, se fez necessário o aumento da produção agrícola no campo, de modo a tornar possível a manutenção das cidades e metrópoles.

A produção de alimentos sempre enfrentou problemas, como espaços de terras agricultáveis, doenças ou pragas ligadas a determinadas espécies e reposição de nutrientes ao solo. Visto isto, para suprir a demanda de insumos do solo, se faz indispensável a utilização de fertilizantes, a fim de possibilitar um crescimento saudável e farto das plantas (JESUS; TEIXEIRA; SANTOS, 2019).

Observando o contexto do Brasil, país tropical, onde há extensos campos agricultáveis, os solos e subsolos apresentam, normalmente, baixa proporção de fósforo às plantas, porém com grande disponibilidade de adsorção/fixação deste elemento. Por outro lado, este nutriente é fundamental para o ciclo das plantas seja completo, influenciando o processo inicial de crescimento e de sustentação nas raízes. O fósforo é necessário ao processo de fotossíntese e de reprodução, bem como ao processo de crescimento e sustentação dos vegetais (FREITAS et al. 2013; LOPES, 1998).

O escoamento superficial das águas pluviais, a erosão, é processo natural que gera perdas de nutrientes. Além disso, práticas de manejo agrícola adotadas, tais como movimentação do solo, substituição da vegetação de origem pela monocultura acabam atenuando o grau de degradação do solo (SPADOTTO; GOMES, 2010). Nesse contexto, estratégias vêm sendo desenvolvidas para um maior aproveitamento de nutrientes pelo solo, a fim de acarretar maior desempenho dos fertilizantes. Uma alternativa encontrada é a utilização de fertilizantes de liberação lenta, como os fertilizantes organominerais (JESUS; TEIXEIRA; SANTOS, 2019).

O fertilizante organomineral possui potencial químico reativo baixo em relação ao fertilizante mineral, no entanto, sua solubilidade é gradual ao longo do período de desenvolvimento da planta. Isso demonstra que a eficiência agrônômica pode ser maior em comparação com a classe de adubos inorgânicos (JESUS; TEIXEIRA; SANTOS, 2019).

A liberação de fosfato dos fertilizantes organominerais é lenta, tornando seus nutrientes mais disponíveis para as raízes das plantas. A substância orgânica transformada, rica em materiais húmicos, tem a capacidade de aumentar a disponibilização de nutrientes, especialmente para as raízes das plantas (KIEHL, 2008). A gradativa solubilidade do fósforo com a matéria orgânica é explicada pela formação de complexos fosfoúmicos, mais absorvidos pelos vegetais; troca aniônica do fosfato pelo íon humato; recobrimento das partículas de sesquióxido pelo húmus, formando uma camada protetora, a qual reduz a capacidade do solo em fixar fosfato (TISDALE; NELSON, 1993).

Por isso, este trabalho tem como objetivo a produção de um fertilizante organomineral de liberação lenta a partir do superfosfato triplo e da borra de café e da utilização de polpa de casca de banana. Misturas de diferentes composições foram peletizadas por extrusão. As amostras foram avaliadas quanto à liberação de nutrientes em água. A melhor formulação foi submetida a revestimento com polímero e à tratamento térmico em mufla, para a pirólise da biomassa, criando o biochar. As novas amostras foram submetidas a teste de liberação de nutrientes. Foi investigada a cinética de liberação de nutrientes de todas as amostras estudadas, para classificação dos fertilizantes como sendo de liberação lenta.

REVISÃO DA LITERATURA

Fertilizantes

As substâncias que fornecem nutrientes para a evolução das plantas, são chamados de fertilizantes. Atualmente, nos sistemas produtivos agrícolas, os fertilizantes são a base para ampliar ou manter a produção, repondo ao solo os elementos que foram perdidos nas colheitas (SILVA; LOPES, 2011). O seu uso é essencial para aumentar o rendimento produtivo das culturas.

Existem elementos químicos que necessitam estar disponíveis nos solos pois são essenciais para que as plantas tenham um desenvolvimento normal. Esses nutrientes podem ser divididos de acordo com as quantidades reivindicadas pelas plantas. O primeiro grupo são os macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), carbono, hidrogênio, oxigênio. O segundo grupo são os micronutrientes: ferro (Fe), boro, cloro, ferro, cobre, manganês, molibdênio, zinco, sódio, silício e cobalto. Segundo os estudos de Loneragan (1997) apud Cabral (2016), apenas sete elementos químicos seriam necessários ao desenvolvimento das plantas, sendo os macronutrientes: nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e os micronutrientes como o ferro (Fe), variando conforme a necessidade da planta.

O fósforo (P) (como fosfato, PO_4^{3-}) é fundamental para o metabolismo das plantas. Dentro da célula esse elemento tem um papel essencial na transferência de energia, respiração e fotossíntese. A energia absorvida pela clorofila durante a fotossíntese é transformada em adenosina trifosfatada (ATP), a qual é a primeira fonte energética exigida no desenvolvimento vegetal (HANSEL, 2013).

A limitação da suplementação de fósforo (P) na fase inicial do desenvolvimento das culturas pode afetar diretamente a otimização da produção final, pois influencia a produtividade em estágios posteriores (HANSEL, 2013).

O uso de fertilizante organomineral é considerado uma opção para propiciar maior resultado e melhor qualidade da produção (ANDRADE et al., 2012). A justificativa para a adição de nutrientes minerais aos fertilizantes orgânicos é busca da diminuição da mineralização, fixação e lixiviação dos nutrientes. Além disso, esses fertilizantes orgânicos têm o inconveniente de não apresentar proporções definidas de NPK, ao contrário das fórmulas comerciais de fertilizantes minerais, nos quais a composição pode ser balanceada conforme a necessidade da planta e do solo (JESUS; TEIXEIRA; SANTOS, 2019).

Para ter um maior rendimento das culturas e melhor qualidade da produção, o emprego da adubação organomineral é uma alternativa. O fertilizante organomineral é definido como: “produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos”. Os adubos orgânicos apresentam baixas concentrações de N, P e K, para complementados com a adição de nutrientes minerais, em contrapartida, as plantas podem usufruir melhor dos nutrientes por meio do sincronismo de liberação lenta ao longo do crescimento das plantas. Os resíduos orgânicos promovem o incremento do pH mantendo teores adequados de P e K no solo, reduzindo a perda de nitrogênio por lixiviação por apresentar uma solubilidade mais lenta. Quando estes são associados com os fertilizantes químicos que contêm na sua composição fósforo e potássio, os quais podem ser balanceados de acordo com as características do solo e com as exigências da planta (RUPPENTHAL; CONTE, 2005).

Em síntese, o uso combinado da aplicação de fertilizantes organominerais pode gerar maior eficiência quando comparados com fertilizantes orgânicos e inorgânicos exclusivamente. Pois a ausência de alguns nutrientes essenciais para a cultura pode ser

complementada pelo uso combinado com outro tipo de fertilizante, que pode conter quantidade maior do elemento ausente no solo (ANDRADE et al., 2012).

Por razões ecológicas como econômicas e sociais, a reutilização de resíduos do café tem sido uma prioridade entre os países com grande produção. Várias estratégias de reaproveitamento destes substratos têm sido testadas por meio de compostagens, fabricação de fertilizantes orgânicos e de biogás, utilização na alimentação animal e na produção de cogumelos (OLIVEIRA; COSTA; LIMA, 2014).

Por causa das propriedades físicas da borra do café (tamanho de partícula pequeno e alta área de superfície específica), o uso dessa matéria orgânica surge como uma alternativa viável para ajudar no gerenciamento da água em solos com baixa coesão, como solos ácidos, que são mais suscetíveis à erosão (KASONGO et al., 2013).

Nas regiões áridas ou semiáridas, onde a água é um recurso escasso ou sua disponibilidade para a colheita é escassa, algumas práticas podem ser usadas para melhorar a retenção de água e, portanto, ajudar no gerenciamento da água. Além disso, em áreas com ocorrência de solos arenosos ou com grandes partículas agregação e condutividade hidráulica, a pequena superfície específica a área associada a outras propriedades leva à adsorção de menos água.

Portanto, o uso de condicionadores de solo, que são produtos de minerais, origem industrial ou orgânica (por exemplo, gesso, polímeros sintéticos, resíduos de poda e lodo de esgoto) é uma opção para diminuir a superfície de evaporação e percolação da água (YANGYUORU et al., 2006). Esses materiais proporcionam a absorção de água e aumentar a capacidade de retenção, modificar as propriedades físico-hidráulicas do solo ao longo da profundidade do solo, como infiltração e armazenamento de água, melhorando sua disponibilidade para as plantas (VALE et al., 2006).

Fertilizantes de liberação lenta são caracterizados pelo atraso na disponibilidade dos nutrientes para absorção e uso das plantas após a aplicação, ou que estenda sua disponibilidade no solo e, portanto, para a planta por um período maior do que fertilizantes convencionais (NASCIMENTO, 2014). Os fertilizantes de liberação lenta são responsáveis por aumentar o tempo que os nutrientes ficam disponíveis às plantas. Além de esta liberação acontecer de acordo com a necessidade da planta. A liberação lenta ocorre quando se há o revestimento de fertilizantes solúveis por polímeros hidrofóbicos orgânicos ou por revestimentos inorgânicos de enxofre (AZEEM et al., 2014). São utilizados também como materiais de revestimento, resinas e polímeros termoplásticos.

Estado da Arte dos Fertilizantes Organominerais

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi realizado algumas pesquisas para ter um embasamento teórico. A **Tabela 1**, mostra alguns desses trabalhos presentes na literatura.

Pesquisas relacionadas com fertilizante de liberação lenta já vem sendo desenvolvidas a algum tempo. Atualmente o desenvolvimento de pesquisas relacionadas ao melhoramento dos fertilizantes, principalmente no seu controle de liberação.

A **Tabela 1** mostra alguns exemplos, como o desenvolvimento de películas de revestimento e melhoramento através de tratamento térmico, juntamente com testes de liberação.

Tabela 1. Trabalhos presentes na literatura

| Autor | Título | Pesquisa realizada |
|---------------------------|--|--|
| Machado e Souza (2012) | Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta | Avaliou-se a disponibilidade de P em solos com diferentes texturas, a partir da incubação de doses crescentes de fosfato monoamônico (MAP) de liberação lenta. |
| Domingues (2015) | Imobilização de fosfatos em microesferas poliméricas contendo biochar: preparação, caracterização e liberação lenta em sistemas aquosos | Preparou-se, caracterizou-se e avaliou-se, em meio aquoso, a liberação lenta de fósforo por microesferas poliméricas de alginato contendo biochar (matéria orgânica pirolisada). |
| Figueiredo et al. (2012) | Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e Parâmetros morfológicos de milho | Avaliou-se o efeito da aplicação de adubo fosfatado revestido com polímero, associada à calagem, na produção e parâmetros morfológicos da cultura do milho. |
| Guareschi et al. (2011) | Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros | Comparou-se fontes, épocas e doses de aplicação e superfosfato triplo e cloreto de potássio revestidos ou não por polímeros no desempenho produtivo da soja em condições edafoclimáticas do cerrado. |
| Ni et al. (2010) | Multifunctional slow-release organic-inorganic compound fertilizer | Preparou-se um fertilizante composto orgânico-inorgânico que possui propriedades atraentes de liberação lenta e desenvolveu-se um tipo de material de revestimento capaz de melhorar a degradabilidade, absorção e retenção de água. |
| Matoso (2018) | Biocarvões enriquecidos com solos naturais e fertilizante fosfatado: caracterização e aplicação em solos tropicais | Avaliou-se diferentes combinações de matérias-primas (orgânicas e minerais) para a composição de biocarvão, de modo a obter um produto capaz de veicular o íon fosfato no solo, protegendo-o das reações de precipitação e adsorção. |
| Zoca et al. (2014) | Resíduos do processamento do café como condicionadores de solo | Caracterizou-se cinco tipos de resíduos de processamento de café, avaliou-se seu valor como fertilizante e investigou-se a liberação de nutrientes após aplicação ao solo. |
| Pogorzelski et al. (2020) | Lascas moídas pós TT (BC) +TSP | T = 350°C e t = 1 h; $\beta = 10^\circ\text{C}/\text{min}$; Misturas com 5, 15 e 25% de biomassa. Reportaram uma liberação de P de 82% em 1.5 h |
| Barbosa et al. (2022) | Produção de pellets de borra de café e TSP com tratamento térmico: T= 300°C,400°C; t = 10, 30, 90 min | Os pellets tratados a 400°C por 30 min apresentaram taxa de liberação lenta , cerca de 3x menor que o TSP. |
| Gonçalves et al. (2022b) | Co-pirólise de resíduo de fraldas (cellulose) e TSP | O tempo de liberação de 75% dos nutrientes foi de 1,8h para 750h após o TT |

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais utilizados para a formulação

A biomassa utilizada para a formulação dos pellets foi a borra de café. Este material foi recolhido da cantina do Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas – Unidade 2 da Universidade Federal do Triângulo Mineiro localizado na cidade de Uberaba-MG. Após coletado o material foi seco em estufa em baixa temperatura (60 °C), por 48h para não correr o risco de degradação da matéria orgânica. O fertilizante utilizado foi o superfosfato triplo (TSP). Para o preparo dos pellets o fertilizante deve estar em forma de pó ($dp < 500 \mu m$) logo triturou-se o fertilizante com água para diminuir a abrasão entre as partículas. A casca da banana foi adicionada na formulação como parte do material ligante, de acordo com a proporção definida pelo planejamento experimental.

Formulação do fertilizante

A fim de obter o efeito das variáveis concentração da pasta de banana e amido em relação a mesma proporção de massa de fertilizante e borra de café, a cada amostra homogeneizou-se os devidos componentes com suas respectivas massas, criando assim uma massa úmida, firme, própria para a extrusão, formando assim os pellets. Com o intuito de analisar as respostas de resistência física e capacidade de retenção do material. Realizou-se 16 formulações, sendo o composto central do experimento 9 ao 16. A **Tabela 2** mostra o planejamento descrito, com as devidas massas de cada experimento em base seca e respectivas frações mássicas. Com a formulação de cada amostra, preparou-se o material e realizou-se uma extrusão de forma manual, com diâmetro de extrusão de 6 mm.

Caracterização física dos pellets

Realizou-se uma caracterização do tamanho e forma dos pellets utilizando o *software* ImageJ para determinar a circularidade, alongamento e perímetro (BONTEMPO et al, 2020).

O teste de queda foi realizado com intuito de avaliar a integridade dos mesmos. De acordo com Carvalho e Brink (2010), esse tipo de ensaio visa simular as condições de manuseio de transporte do briquete. O autor descreve que a resistência ao impacto dos briquetes pode ser determinada a partir de ensaios de queda livre. A partir de uma altura de 0,3 m, caso não tenha sido submetido a tratamento térmico, até 1,5 m caso tenha. A resistência ao impacto é determinada pelo número de quedas que o briquete resiste fragmentando-se apenas até o ponto em que perde no mínimo 5% de sua massa inicial. O briquete é solto das respectivas alturas até colidir com um anteparo de concreto. O procedimento é repetido sucessivas vezes até que tenha perdido 5% da sua massa inicial.

O teste de queda foi realizado em triplicata, sendo que cada teste abrange quedas de alturas de 100 e 150 cm, para cada uma das amostras produzidas.

Teste de liberação em água

As análises de liberação seguiram o método feito por Pereira (2014). Foi montado um aparato em que as massas de 3 pellets com uma média de 1.196 ± 0.178 g foram colocadas em um béquer imersos em meio aquoso sob agitação externa ao béquer em 5 L de água, por 24h. A forma de agitação proposta tem como base garantir que o teor do

componente ativo medido no meio líquido fosse correspondente à difusão para o meio e não a ação mecânica do agitador.

Tabela 2. Planejamento dos experimentos variando a massa de banana (M_B) e de amido (M_A), com massa de fertilizante $M_F=179,15$ g e massa de borra de café $M_{BC}= 100$ g, bem como as frações mássicas de banana (f_B), amido (f_A), fertilizante (f_F) e borra de café (f_{BC})

| Amostra | Variáveis | | Frações Mássicas | | | |
|---------|-----------|-----------|------------------|-------|-------|----------|
| | M_B [g] | M_A [g] | f_B | f_A | f_F | f_{BC} |
| 1 | 8,379 | 1,464 | 0,029 | 0,005 | 0,620 | 0,346 |
| 2 | 8,379 | 8,536 | 0,028 | 0,029 | 0,605 | 0,338 |
| 3 | 48,866 | 1,464 | 0,148 | 0,004 | 0,544 | 0,304 |
| 4 | 48,866 | 8,536 | 0,145 | 0,025 | 0,532 | 0,297 |
| 5 | 0,000 | 5,000 | 0,000 | 0,018 | 0,630 | 0,352 |
| 6 | 57,245 | 5,000 | 0,168 | 0,015 | 0,525 | 0,293 |
| 7 | 28,622 | 0,000 | 0,093 | 0,000 | 0,582 | 0,325 |
| 8 | 28,622 | 10,000 | 0,090 | 0,031 | 0,564 | 0,315 |
| 9 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 10 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 11 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 12 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 13 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 14 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 15 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |
| 16 | 28,622 | 5,000 | 0,092 | 0,016 | 0,573 | 0,320 |

Os testes foram realizados em pH neutro, a temperatura ambiente. Mediu-se a liberação por meio da condutividade elétrica da solução. Foi utilizado um condutivímetro da Vernier e os dados foram lidos pelo *software Logger Lite* a cada segundo por 3 horas. Após esse tempo o material foi desintegrado e agitado até a condutividade elétrica manter constante. A fim de obter a condutividade final, ou seja, todo o fertilizante foi liberado.

Com os dados da condutividade de liberação, realizou-se um tratamento pelo *software Excel*, fazendo uma porcentagem de liberação dividindo cada ponto pelo valor final, como mostra a **Equação 1**.

$$X_N = \frac{\sigma_N}{\sigma_F} \quad (1)$$

em que n é o ponto da amostra; σ_n é a condutividade elétrica no ponto n e σ_f é a condutividade final. Após este tratamento de dados obteve as curvas de liberação dos nutrientes, que é proporcional a condutividade elétrica da solução.

Melhoramento do fertilizante

Tratamento Térmico: O processo de pirólise foi realizado em mufla, nas temperaturas de 300 °C e 400 °C, e diferentes tempos de tratamento térmico: 10, 20, 30 e 90 min para a amostra com menor tempo de liberação. Cerca de 15 g de pellets foram pesados antes e após cada tratamento térmico, para avaliar a perda de massa. Em seguida, essas amostras foram submetidas ao teste de liberação em tanque agitados de 5L por 24 h, empregando o mesmo método descrito anteriormente (GONÇALVES et al, 2022b). A utilização desse

tratamento térmico traz aos fertilizantes dois benefícios por promover a formação de biocarvão e a adsorção do fosfato nos poros deste carvão. Esta mudança no material traz uma maior quantidade de sítios, em que o fertilizante tem uma maior dificuldade de liberação e pode proporcionar a adsorção de impurezas no solo.

Recobrimento: Realizou-se o recobrimento da amostra de menor tempo de liberação. Este processo foi feito com um polímero próprio para recobrir fertilizante, cedido pela empresa Paraíba Fertilizantes. O processo de recobrimento foi realizado por imersão e colocado em estufa a 60 °C por 24 h.

Cinética de liberação dos nutrientes em água

A fim de conhecer os fenômenos que ocorrem durante a liberação de P em água, foram ajustados dois modelos cinéticos empregados em testes de liberação, sendo eles o Modelo de Weibull (**Equação 2**) e o Modelo de Korsmeyer-Peppas (**Equação 3**).

$$X = \frac{M_i}{M_\infty} = 1 - \exp(-A \cdot t^b) \quad (2)$$

$$X = \frac{M_i}{M_\infty} = K \cdot t^n \quad (3)$$

em que X é a razão entre a massa de fertilizante liberada no tempo i (M_i) e a massa total de fertilizante no pellet (M_∞); A é um parâmetro do modelo de Weibull que define o tempo escala do processo, b é um expoente que caracteriza a curva como exponencial (b=1, caso I da difusão), curva sigmóide, com curvatura ascendente seguida por um ponto de retorno (b>1, caso II da difusão), ou parabólica (b<1) (GONÇALVES et al, 2022a).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física dos pellets

A partir da extrusão manual, gerou-se as 16 amostras de fertilizantes. Com o uso do *software* ImageJ foi possível analisar os pellets e determinar algumas de suas características como o alongamento (1,207) e circularidade (0,707). Assim, podemos dizer que amostra é pouco longa, similar a um cilindro, como obtido por Barbosa et al. (2022).

Quanto à resistência ao transporte e armazenamento, a **Tabela 3** apresenta os valores médios de número de quedas e desvio padrão para cada amostra. Após a análise estatística, não se pode verificar o efeito da adição de amido e da pasta de banana sobre a resistência do material. O alto valor do desvio padrão das amostras referentes ao ponto central (réplicas) indicam uma heterogeneidade do material. A forma de extrusão manual pode ter influenciado na estrutura dos pellets, bem como a o formato irregular dos pellets.

O fertilizante organomineral desenvolvido por Barbosa et al (2022) apresentou número máximo de queda de 92 e 32 quedas para as alturas de 100 cm e 150 cm, respectivamente. Ou seja, os autores obtiveram um fertilizante mais resistente do que o encontrado neste trabalho, o que pode ser explicado pelas diferenças no método de extrusão, que usou forças de compactação do extrudado.

Tabela 3. Médias e desvio padrão dos testes de queda das amostras

| Amostra | Altura 1 m | | Altura 1,5 m | |
|---------|------------|---------------|--------------|---------------|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| 1 | 2,33 | 1,15 | 2,67 | 1,53 |
| 2 | 4,67 | 1,15 | 4,00 | 1,00 |
| 3 | 3,33 | 1,53 | 2,00 | 1,00 |
| 4 | 5,00 | 1,00 | 3,00 | 1,00 |
| 5 | 7,00 | 1,00 | 4,00 | 2,00 |
| 6 | 3,33 | 0,58 | 4,67 | 1,53 |
| 7 | 8,67 | 4,16 | 7,33 | 1,53 |
| 8 | 4,67 | 1,15 | 3,33 | 0,58 |
| 9 | 6,67 | 1,15 | 5,00 | 1,00 |
| 10 | 5,67 | 2,31 | 4,33 | 1,32 |
| 11 | 3,33 | 0,58 | 3,33 | 1,53 |
| 12 | 3,00 | 1,00 | 2,33 | 1,53 |
| 13 | 2,00 | 1,00 | 2,33 | 0,58 |
| 14 | 3,00 | 1,00 | 3,67 | 1,53 |
| 15 | 3,00 | 0,00 | 2,67 | 0,58 |
| 16 | 6,33 | 1,15 | 4,56 | 1,53 |

Teste de liberação de P em meio aquoso dos Pellets

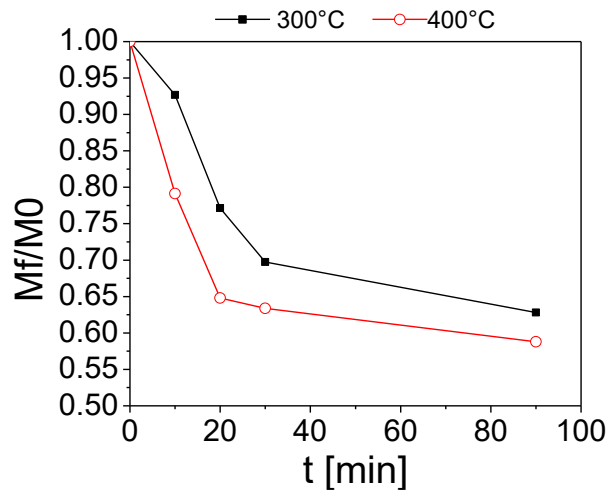
A partir das análises e do tratamento dos dados, foram obtidas as curvas de liberação das 16 formulações. Observou-se que a formulação F15 foi a que apresentou uma liberação mais lenta, levando cerca de 1h para a liberação de 50% dos nutrientes e 8h para a liberação total. As amostras F9 a F16 possuem a mesma composição, entretanto não foi obtido as mesmas taxas de liberação. Este fato pode ser explicado devido extrusão de forma manual. Pela extrusão de forma manual não é possível obter pellets homogêneos para todas as amostras, pois não se consegue uma força de compactação e velocidade constante, tendo assim pellets compactação heterogênea e com espaços vazios em seus núcleos. Os pellets com espaços vazios acabam formando bolhas de ar em seu núcleo. Assim, no momento que ficam imersos em água, as bolhas tendem a sair causando a quebra da estrutura do pellet e liberando o fertilizante de forma mais rápida (BARBOSA et al., 2022). Assim, a formulação escolhida para realizar o recobrimento e o tratamento térmico foi a amostra F15.

Tratamento Térmico da Formulação F15

A **Figura 1** mostra a curva da fração de perda de massa da amostra com o tempo de tratamento térmico, nas temperaturas de 300 °C e 400 °C. Pode-se observar que a devolatilização ocorre de forma mais rápida na maior temperatura, fazendo com que a massa final das amostras nesta condição seja menor. Assim, após 90 min a 400°C, houve uma redução de 41,2% da massa inicial dos pellets, sendo que a porcentagem inicial de matéria orgânica no pellet correspondia a 42,7% em massa.

According to Barbosa et al (2022), the pellets thermally treated for 90 min were not suitable for transport and handling due its fragile mechanical structure.

Figura 1. Fração da perda de massa (Mf/M0) da amostra F15 após a pirólise a 300°C e 400°C, nos tempos de tratamento térmico de 10, 20, 30 e 90 min



Durante o tratamento térmico, a matéria orgânica sofre pirólise devido à atmosfera pobre em oxigênio, podendo ocorrer uma pequena perda de massa também por combustão de parte da amostra. Assim, acredita-se que parte do fertilizante pode ser perdido durante este processo, no qual o fertilizante pode estar reagindo com os voláteis que se desprendem da amostra durante o tratamento térmico (BARBOSA et al, 2022). Sendo assim, as amostras foram submetidas a teste de liberação para avaliação da liberação de fósforo (P) em meio aquoso.

A **Tabela 4** apresenta a massa inicial dos 3 pellets empregados em cada um dos testes de liberação, antes e após a pirólise, bem como o valor da condutividade elétrica da solução medida experimentalmente no fim do experimento (Co_{Exp} [μSc]) e a condutividade esperada (Co_{Calc}), calculada a partir da massa de fertilizante presente na amostra se todo o fertilizante permanecesse na amostra após o tratamento térmico.

Tabela 4. Condições do tratamento térmico aplicado à Amostra F15, dados de perda de massa no tratamento e resultados da condutividade no final do teste de liberação

| Amostra | Variáveis | | Pirólise | | | Teste de Liberação | |
|----------|-----------|---------|----------|--------|-------|-------------------------|--------------------------|
| | T [°C] | t [min] | M0 [g] | Mf [g] | Mf/M0 | Co_{Exp} [μSc] | Co_{Calc} [μSc] |
| F-300-10 | 300 | 10 | 1,658 | 1,537 | 0,927 | 123,8 | 135,1 |
| F-300-30 | 300 | 30 | 1,271 | 0,887 | 0,697 | 62,3 | 105,2 |
| F-300-90 | 300 | 90 | 1,248 | 0,784 | 0,628 | 25,1 | 103,4 |
| F-400-10 | 400 | 10 | 1,543 | 1,221 | 0,791 | 73,3 | 126,1 |
| F-400-30 | 400 | 30 | 1,844 | 1,169 | 0,634 | 89,6 | 149,5 |
| F-400-90 | 400 | 90 | 1,333 | 0,784 | 0,588 | 41,2 | 110,0 |

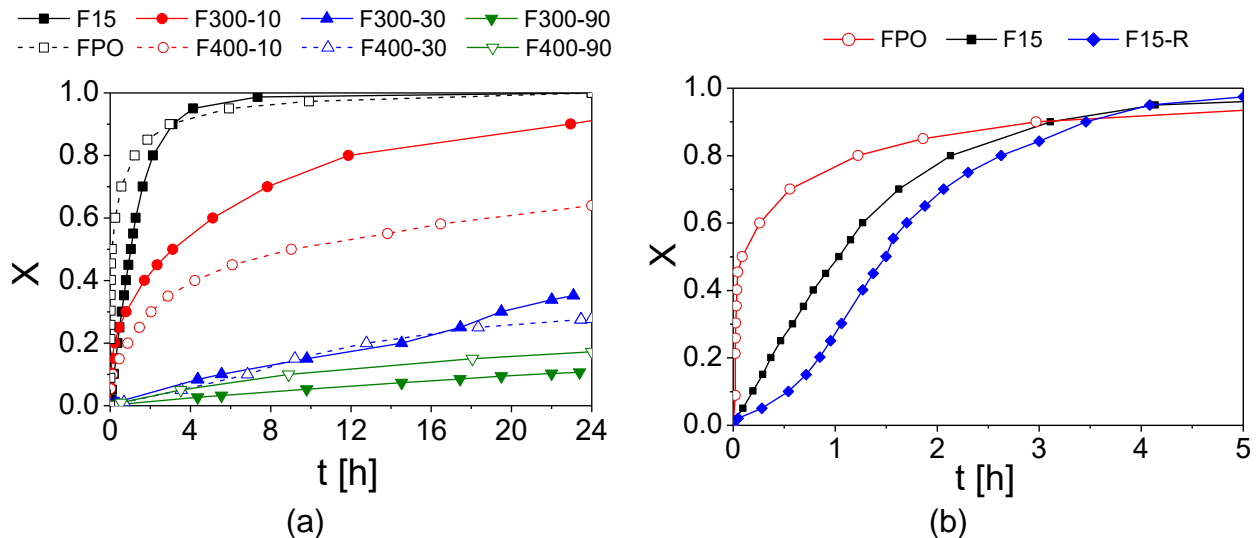
Como pode ser observado os valores de condutividade experimental são menores quando o tempo de exposição se torna maior e quanto maior for a temperatura também. A perda de fertilizante pode ser observada, porém os experimentos devem ter um maior tempo de avaliação para se obter uma certeza das quantidades perdidas. Nos tempos de 90 min as condutividades estão muito distantes, logo pode se concluir que para esse tratamento um tempo de 10 min é o mais apropriado.

Barbosa et al (2022) estudaram o efeito do tempo e da temperatura TT sobre a

liberação de nutrientes. Os pellets submetidos ao TT a 400 °C por 30 min apresentaram aumento do tempo de meia-vida de liberação ($t_{50\%}$), que foi classificado como liberação lenta segundo os critérios de Trenkel (2010) ($t_{15\%} > 24$ h e $t_{75\%} > 28$ dias). Isso demonstrou o potencial significativo do TT na modificação da matriz particulada.

A **Figura 2a** apresenta as curvas da fração de liberação de P das amostras provenientes do tratamento térmico. A fração liberada no tempo foi obtida usando a condutividade elétrica total calculada como referência. Pode-se observar que todas as amostras tratadas termicamente apresentaram liberação mais lenta que a amostra F15, confirmando que o tratamento térmico altera a estrutura da partícula, de forma que o pellet não se desintegre já no início da liberação, como ocorreu com a amostra F15. No entanto, vale ressaltar que maiores temperaturas e maiores tempos de exposição parece conduzir a perdas de fertilizante.

Figura 2. Comparação da fração de liberação de fósforo (X) da amostra F15 e de fertilizante em pó (FPO) com: (a) as amostras tratadas termicamente a 300°C e 400°C; (b) amostra F15 recoberta



Como o formato das curvas de liberação mudam, estima-se que pode ocorrer uma mudança no mecanismo de liberação de P nas amostras, o que pode ser mais bem avaliado por meio do estudo da cinética de liberação.

Neste sentido, Gonçalves et al. (2022b) avaliaram a composição do fertilizante organomineral a base de resíduo celulósico e TSP e reportaram uma pequena redução (20%) no teor de P_2O_5 total após o TT dos pellets.

Recobrimento

A amostra F15 foi recoberta e realizado os testes de liberação de P. A **Figura 2b** mostra as curvas de liberação do fertilizante em pó, da amostra F15 e da amostra recoberta (F15-R), onde é possível verificar que a amostra recoberta libera de forma mais lenta que o fertilizante puro em pó e que o pellet da amostra F15.

Cinética de Liberação dos fertilizantes

A **Tabela 5** mostra os parâmetros dos modelos de Weibull e Korsmeyer-Peppas (ou Power Low) estimados por regressão não linear empregando o método de Mínimos

Quadrados, para todos os fertilizantes estudados neste trabalho. Em todos os casos, o modelo de Weibull foi o que melhor representou a cinética de liberação de P em água. No entanto, o melhor ajuste desse modelo pode indicar uma menor contribuição da difusão e maior contribuição da diluição (SCHAFFAZICK; GUTERRES, 2002).

A maioria dos fertilizantes peletizados por extrusão manual, segundo o PCC da **Tabela 2**, apresentou o parâmetro $b > 1$. Segundo Papadopoulos et al. (2006), o parâmetro b é um indicador do mecanismo de transporte de uma substância através de uma matriz da partícula, sendo que $b \leq 0,75$ indica difusão Fickiana. Quando $0,75 < b < 1$, ocorre um mecanismo combinado, associando o transporte Fickiano com o transporte Caso-II, resultado do inchamento/relaxamento da matriz sólida (ou liberação mediante erosão), que envolve a transição de um estado semi-rígido a outro mais flexível (LOPES et al, 2005).

O parâmetro n do modelo de Korsmeyer-Peppas também é utilizado para indicar os mecanismos de liberação, sendo que para partículas cilíndricas, $n < 0,45$ a liberação é do tipo quasi-Fickiana, caracterizada pelo fluxo disperso da concentração ao longo da partícula. Quando $n = 0,45$, o mecanismo que controla a liberação é a difusão Fickiana. Para $n = 0,89$, a Equação 3 corresponde a cinética de ordem zero, em que predomina o mecanismo de transporte de Caso II. Na faixa $0,45 < n < 0,89$, o transporte combinado ou anômalo ocorre, combinando os mecanismos de difusão e de transporte de Caso II.

Assim, observando os valores de b e n estimados para os fertilizantes F9 a F16, é possível confirmar que a forma de extrusão aplicada produziu pellets heterogêneos, com diferentes mecanismos de liberação, apresentando valores de b entre 0,847 e 1,491, o que sugere também que houve a erosão da partícula devido ao fenômeno de intumescimento, o que foi observado visualmente durante o teste de liberação em meio aquoso. O mesmo foi observado nos demais fertilizantes (de F1 a F8), apesar de não ser possível avaliar a influência dos aditivos empregados na formulação sobre a cinética, devido à heterogeneidade dos pellets.

Com relação à cinética do fertilizante em pó (FPO), observa-se que $b = 0,3788$ e $n = 0,1185$, sinalizando que o mecanismo predominante é a difusão Fickiana, uma vez que não há uma matriz segurando o pó, ele se dissolve e o P se difunde do Becker pequeno até o ceio do fluido. Esse resultado está de acordo com os reportados por Barbosa et al. (2022) and Gonçalves et al. (2022a,b) que utilizaram o TSP como fonte mineral.

Quanto ao fertilizante F15 recoberto, o valor de $b = 1,557$ indica uma curva de formato sigmóide, em que o intumescimento dos pellets controla a liberação de P. Durante o teste, observou-se visualmente um inchamento gradativo da partícula e a dissolução da parte interna, mesmo a membrana externa não se rompendo. Ao fim do teste, a matriz sólida interna já havia sido desfeita. Apesar disso, a camada de recobrimento aumentou o tempo de liberação de P.

Com relação aos pellets com TT, houve uma diminuição do parâmetro de escala A quando comparado aos fertilizantes extrusados sem tratamento e o FPO. Quanto menor o parâmetro A , menor é a taxa de liberação de fósforo. Quanto ao mecanismo, observa-se que apenas o F300-30 apresentou $b > 1$ e os demais tiveram valores de b entre 0,42 a 0,85, indicando que o tratamento alterou a estrutura da matriz dos pellets, introduzindo o efeito da difusão Fickiana, diminuindo assim a taxa de liberação do fertilizante em meio aquoso.

Tabela 5. Parâmetros dos modelos de Weibull e Kormsmeier-Peppas

| | Modelo de Weibull | | | | Modelo de Kormsmeier-Peppas | | | |
|---------|---|---------------|----------------|--------|--|---------------|----------------|--------|
| | | | | | | | | |
| | $X = \frac{M_i}{M_\infty} = 1 - \exp(-A \cdot t^b)$ | | | | $X = \frac{M_i}{M_\infty} = K \cdot t^n$ | | | |
| | Parâmetro | Desvio padrão | R ² | | Parâmetro | Desvio padrão | R ² | |
| F1 | A | 1,0401 | 0,0005 | 0,9986 | K | 0,6081 | 0,0009 | 0,9634 |
| | B | 1,0017 | 0,0008 | | n | 0,4752 | 0,0018 | |
| F2 | A | 1,8044 | 0,0025 | 0,9925 | K | 0,7221 | 0,0012 | 0,8539 |
| | N | 1,3155 | 0,0023 | | n | 0,3840 | 0,0021 | |
| F3 | A | 1,2049 | 0,0013 | 0,9887 | K | 0,6477 | 0,0011 | 0,8473 |
| | B | 1,1789 | 0,0020 | | n | 0,3492 | 0,0016 | |
| F4 | A | 1,0719 | 0,0010 | 0,9956 | K | 0,6146 | 0,0011 | 0,9388 |
| | B | 1,0970 | 0,0016 | | n | 0,4851 | 0,0023 | |
| F5 | A | 1,1422 | 1,1422 | 0,9974 | K | 0,6278 | 0,0012 | 0,9335 |
| | B | 1,1571 | 1,1571 | | n | 0,4919 | 0,0025 | |
| F6 | A | 1,7246 | 0,0021 | 0,9961 | K | 0,7323 | 0,0014 | 0,8916 |
| | N | 1,1142 | 0,0018 | | n | 0,3789 | 0,0025 | |
| F7 | A | 1,5541 | 0,0016 | 0,9954 | K | 0,7154 | 0,0013 | 0,8930 |
| | B | 0,9812 | 0,0015 | | n | 0,3449 | 0,0021 | |
| F8 | A | 1,8627 | 0,0045 | 0,9903 | K | 0,7428 | 0,0021 | 0,8041 |
| | B | 1,0727 | 0,0034 | | n | 0,2584 | 0,0026 | |
| F9 | A | 1,1267 | 1,1267 | 0,9953 | K | 0,6165 | 0,0015 | 0,9259 |
| | B | 1,3801 | 1,3801 | | n | 0,5524 | 0,0031 | |
| F10 | A | 1,2253 | 0,0019 | 0,9938 | K | 0,6394 | 0,0016 | 0,9072 |
| | N | 1,4913 | 0,0033 | | n | 0,5168 | 0,0032 | |
| F11 | A | 1,6964 | 0,0008 | 0,9993 | K | 0,7324 | 0,0013 | 0,9144 |
| | B | 1,1271 | 0,0008 | | n | 0,4008 | 0,0024 | |
| F12 | A | 1,5049 | 0,0006 | 0,9994 | K | 0,7094 | 0,0010 | 0,9429 |
| | B | 1,0558 | 0,0006 | | n | 0,4224 | 0,0020 | |
| F13 | A | 1,2566 | 0,0029 | 0,9871 | K | 0,7022 | 0,0027 | 0,7223 |
| | B | 1,0766 | 0,0039 | | n | 0,1876 | 0,0022 | |
| F14 | A | 1,5476 | 0,0010 | 0,9975 | K | 0,7292 | 0,0009 | 0,9387 |
| | N | 0,8465 | 0,0009 | | n | 0,3414 | 0,0016 | |
| F15 | A | 0,6848 | 0,0008 | 0,9983 | K | 0,5420 | 0,0024 | 0,8888 |
| | B | 1,0803 | 0,0015 | | n | 0,3554 | 0,0030 | |
| F16 | A | 0,8657 | 0,0003 | 0,9991 | K | 0,5502 | 0,0009 | 0,9694 |
| | B | 1,1303 | 0,0006 | | n | 0,5701 | 0,0019 | |
| FPO | A | 1,5166 | 0,0010 | 0,9869 | K | 0,7660 | 0,0006 | 0,9099 |
| | B | 0,3790 | 0,0005 | | n | 0,1196 | 0,0005 | |
| F15-R | A | 0,3587 | 0,0009 | 0,9971 | K | 0,6009 | 0,0038 | 0,6550 |
| | N | 1,5568 | 0,0032 | | n | 0,1942 | 0,0025 | |
| F300-10 | A | 0,3733 | 0,0006 | 0,9957 | K | 0,3715 | 0,0007 | 0,9802 |
| | B | 0,5755 | 0,0006 | | n | 0,2924 | 0,0007 | |
| F300-30 | A | 0,0150 | 0,0001 | 0,9779 | K | 0,0173 | 0,0001 | 0,9831 |
| | B | 1,0511 | 0,0032 | | n | 0,9476 | 0,0025 | |
| F300-90 | A | 0,0079 | 0,0000 | 0,9994 | K | 0,0081 | 0,0000 | 0,9994 |
| | B | 0,8504 | 0,0004 | | n | 0,8226 | 0,0004 | |
| F400-10 | A | 0,2687 | 0,0003 | 0,9924 | K | 0,2465 | 0,0003 | 0,9833 |
| | N | 0,4223 | 0,0005 | | n | 0,3110 | 0,0006 | |
| F400-30 | A | 0,0249 | 0,0002 | 0,9729 | K | 0,0281 | 0,0002 | 0,9674 |
| | B | 0,8239 | 0,0026 | | n | 0,7338 | 0,0025 | |
| F400-90 | A | 0,0249 | 0,0002 | 0,9589 | K | 0,0257 | 0,0002 | 0,9573 |
| | B | 0,6438 | 0,0025 | | n | 0,6061 | 0,0024 | |

No entanto, como mencionado anteriormente, acredita-se que o tratamento térmico alterou a quantidade de fertilizante presente no pellet, sendo mais indicado trabalhar com tempos baixos de tratamento térmico, entre 10 e 20 min, para diminuir a possibilidade de reações indesejadas que causem a perda de fertilizante.

A fim de comparar os fertilizantes estudados, foi calculado o tempo em que houve a liberação de 50% do fertilizante presente nas amostras FPO, F15, F15-R e os fertilizantes tratados termicamente, como mostra a **Tabela 6**.

Tabela 6. Comparação do tempo em que houve liberação de 50% de fósforo ($t_{X=0,5}$ [h]) presente no Fertilizante em pó (FPO), fertilizante extrusado F15 e recoberto (F15-R), bem como os fertilizantes tratados termicamente

| | FPO | F15 | F15-R | F300-10 | F300-30 | F300-90 | F400-10 | F400-30 | F400-90 |
|-----------------|-------|--------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $t_{X=0,5}$ [h] | 0,127 | 1,0115 | 1,527 | 3,12 | 38,41 | 194 | 9,03 | 56,6 | 174,9 |

Pode-se observar que o pellet extrusado F15 apresentou um tempo cerca de 8 vezes maior para atingir a liberação de 50% de P, quando comparado com o fertilizante em pó, mostrando que o pellet extrusado tem uma liberação mais lenta. Quanto ao efeito do revestimento, a amostra F15-R liberou em um tempo 50% maior que o pellet não recoberto. Já as amostras tratadas termicamente apresentaram os maiores tempos de liberação, entre 3 a 194 h para liberar 50% do fertilizante, sendo esse um bom tempo, já que a planta necessita de P durante todo a sua vida.

O tempo de liberação da amostra F300-10 foi cerca de 24 vezes maior que o fertilizante em pó e 3 vezes superior ao da amostra F15, não tratada termicamente, o que mostra o grande potencial do tratamento térmico na alteração da matriz da partícula, diminuindo os efeitos do mecanismo de intumescimento e proporcionando um maior efeito da liberação pelo mecanismo difusivo Fickiano (GONÇALVES et al., 2022b).

O fertilizante organomineral desenvolvido por Barbosa et al (2022), baseado em borra de café, mostrou uma cinética de liberação de nutrientes controlada pelo mecanismo de Difusão Fikiana, de acordo com o modelo de Weibull ($A = 0,013$ e $B = 0,667$). O valor de A encontrado pelos autores é bem menor do que os encontrados neste trabalho, mostrando que eles obtiveram maiores tempos de liberação.

Gonçalves et al. (2022a) produziram um fertilizante organomineral usando o resíduo celulósico proveniente de fraldas fora de especificação. Acinética de liberação de P a partir dos pellets sem TT seguiu o modelo de Weibull ($A = 0,014$ and $B = 0,512$). Gonçalves et al. (2022b) reportaram que os pellets com TT a 500°C por 10 min. O principal mecanismo que controlou a liberação foi a difusão Fikiana. A cinética foi descrita pelo modelo de Weibull ($A = 3 \times 10^{-6}$ b = 0,940). Assim, o tempo em que houve a liberação de 75% de P passou de 1,8h para 750h após o tratamento térmico, confirmando as propriedades de liberação lenta do material.

Os fertilizantes com TT apresentam diversas vantagens, incluindo a habilidade de gerar a liberação lenta e prolongada dos nutrientes. Essas características impactam na redução de perdas por lixiviação, aumentando a biodisponibilidade de de nutrientes e o crescimento das culturas.

CONCLUSÃO

Com as 16 amostras de fertilizante formuladas constatou-se a heterogeneidade na formação dos pellets, que pode ser explicada pela extrusão realizada de forma manual.

Com essa heterogeneidade não foi possível analisar as influências dos aditivos nas formulações feitas pelo planejamento de composto central.

Por meio dos testes de liberação realizado em água foi possível analisar as curvas de liberação de cada amostra, tendo a amostra F15 com menor tempo de liberação. Os testes de melhoramento do fertilizante organomineral, aplicados à amostra F15 mostraram uma eficácia no seu desempenho. A amostra recoberta com o polímero obteve um tempo de liberação 8 vezes menor que o do fertilizante F15 não recoberto.

O tratamento térmico obteve um ótimo melhoramento na matriz do pellet, porém há uma provável perda de fertilizante devido a reações indesejadas. Para evitar esse fato, a aplicação do tratamento térmico com baixo tempo de exposição é o mais indicado. O modelo de Weibull foi o mais apropriado para descrever a cinética de liberação de fósforo em meio aquoso, tendo uma maior contribuição para a diluição.

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se a produção dos fertilizantes através de extrusão mecânica para averiguar uma melhor homogeneidade das amostras; realizar a análise de liberação por um tempo maior para as amostras com tratamento térmico, até a obtenção de uma condutividade constante; testar outros ligantes, como lignina e melado de cana.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, E. M. G.; SILVA, H. S.; SILVA, N. S.; SOUSA JÚNIOR, J. R.; FURTADO, G. F. Adubação organomineral em hortaliças folhosas, frutos e raízes. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 7-11, 2012.
- AZEEM, B.; ZILATI, K.; KUSHAARI, K.; MAN, Z. B.; BASIT, A.; THANH, T. H. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, 181, 11-21, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>
- BARBOSA, N. S. **Desenvolvimento de fertilizante organomineral fosfatado peletizado a base de borra de café para fins de liberação lenta**. Dissertação (Mestrado Multicêntrico em Química de Minas Gerais) - Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2020.
- BONTEMPO, L. H. S.; CASTEJON, L. V., SANTOS, K. G. Drying of Tangerine peel: kinetics and performance of a convective solar dryer. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i6.3458>.
- CABRAL, B. V. **Biossolubilização de fósforo proveniente de concentrado de rocha fosfática por *Trichoderma harzianum* em diferentes biorreatores**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2016.
- CARVALHO, E. A., BRINCK, V. Aglomeração – Parte I: Briquetagem. In: LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- DOMINGUES, T. M. **Imobilização de fosfatos em microesferas poliméricas contendo biochar: preparação, caracterização e liberação lenta em sistemas aquosos**. Tese de mestrado em Ciências Ambientais da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2015.
- FIGUEIREDO, C. C.; BARBOSA, D. V.; OLIVEIRA, S. A.; FAGIOLI, M.; SATO, J. H. Adubo fosfatado revestido com polímero e calagem na produção e Parâmetros morfológicos de milho. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 3, p. 446-452, 2012.

FREITAS, R. M. O.; NOGUEIRA, N. W.; PINTO, J. R.; TOSTA, M. S.; DOMBROSKI, J. L. D. Fertilizante fosfatado no desenvolvimento inicial de mudas de pinheira. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 2, p. 319-327, 2013.

GONÇALVES, C. R.; SANTOS, M. K. G.; BARROZO, M. A. S. Desenvolvimento de um fertilizante organomineral com biomassa de fraldas fora de especificação. In: **Anais do XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, Uberlândia, MG, 2022a. Disponível em: <http://enemp2022.com.br/trabalhosfinais/PET22.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2023.

GONÇALVES, C. R.; SANTOS, M. K. G.; BARROZO, M. A. S. Estudo sobre a obtenção de um fertilizante organomineral de liberação lenta submetido a tratamento térmico. In: **Anais do XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, Uberlândia, MG, 2022b. Disponível em: <http://www.enemp2022.com.br/trabalhosfinais/PET21.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2023.

GUARESCHI, R. F.; GAZOLLA, P. R.; PERIN, A.; SANTINI, J. M. K. Adubação antecipada na cultura da soja com superfosfato Triplo e cloreto de potássio revestidos por polímeros. **Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 643-648, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000400001>

HANSEL, F. D. **Efficiency of phosphate sources applied by broadcasting and banding in soybean crop managed under no-till**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

TEIXEIRA, G. F.; SANTOS, K. G.; JESUS, T. M. Secagem da mistura fertilizante biomassa para produção de fertilizantes de liberação lenta. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica**, Uberlândia, MG, 2019. Disponível em: <http://cobegic2019.com.br/trabalhosfinais/ERC37.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2022.

KASONGO, R. K.; VERDOODT, A.; KANYANKAGOTE, P.; BAERT, G.; VAN RANST, E. Coffee waste as an alternative fertilizer with soil improving properties for Sandy soils in humid tropical environments. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 94–102. 2011. DOI: [10.1111/j.1475-2743.2010.00315.x](https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00315.x)

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Organominerais**. 2.ed. Piracicaba: Degaspari, 2008. 160p.

LOPES, C. M.; LOBO, J. M. S.; COSTA, P. Modified release of drug delivery systems: hydrophilic polymers. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 41, n. 2, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-93322005000200003>

MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E. Disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico de liberação lenta, **Bioscience Journal**, v. 28, supplement 1, p. 1-7, 2012.

MATOSO, S. C. G. **Biocarvões enriquecidos com solos naturais e fertilizante fosfatado: caracterização e aplicação em solos tropicais**. Tese (Doutorado em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede Bionorte) - Universidade Federal de Rondônia, 2018.

NASCIMENTO, V. R. **Secagem convectiva e com radiação infravermelha de grãos de *Moringa oleifera* Lam.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

NI, B.; LIU, M.; LÜ, S.; XIE, L.; WANG, Y. Multifunctional Slow-Release Organic-Inorganic Compound Fertilizer. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 23, p. 12373–12378, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf1029306>.

OLIVEIRA, P. P.; COSTA, A. C.; LIMA, W. L. Utilização da borra de café na produção de mudas de chicória. **Cadernos de Agroecologia**, v. 9, n. 4, 2014.

PAPADOPOULOU, V.; KOSMIDIS, K.; VLACHOU, M.; MACHERAS, P. On the use of the Weibull function for the discernment of drug release mechanisms. **International Journal of Pharmaceutics**, v.309, v. 17, 44–50, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2005.10.044>

PEREIRA, E. I. **Estudo do processo de liberação lenta de fertilizantes a partir de nanocompósitos de matriz de ureia**. 2014. Dissertação (Mestre em Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2014.

POGORZELSKI, D; LUSTOSA FILHO, J. F.; MATIAS, P. C. SANTOS, W. O.; VERGÜTZ, L.; MELO, L. C. A. Biochar as composite of phosphate fertilizer: characterization and agronomic effectiveness. **Science of The Total Environment**, v. 743, 140604, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140604>

RUPPENTHAL, V.; CONTE, M. A. Efeito do composto de lixo urbano na nutrição e produção de gladiolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p.145- 150, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000100016>

SCHAFFAZICK, S. R.; GUTERRES, S. S. Caracterização e estabilidade físico-química de sistemas poliméricos nanoparticulados para administração de fármacos. **Química Nova**, v.26, n.5, p 726-737, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422003000500017>

SILVA, D.; LOPES, A. **Princípios básicos para formulação e mistura de fertilizantes**. Boletim técnico nº 89. Lavras: UFLA, 2012. 46 p.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A. F. Perdas de Nutrientes. **Ageitec. Agência Embrapa de Informação Tecnológica**, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/residuos/perdas-de-nutrientes>. Acesso em: 28 mar. 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 722p.

TISDALE, S.; NELSON, W. E. **Soil fertility and fertilizers**. 5th ed. New York: Mac Milan, 1993.

VALE, G. F. R.; SAMUEL, P. C.; PAIVA, L. C. Efficiency evaluation of water absorbing polymers on after planting coffee plant growth. **Coffee Science**, v. 1, n. 1, p. 7-13, 2006.

YANGYUORU, M.; BOATENG, E.; ADIKU, S.G.K.; ACQUAH, D.; ADJADEH, T.A.; MAWUNYA, F. Effects of natural and synthetic soil conditioners on soil moisture retention and maize yield. **West African Journal of Applied Ecology**, v.9, n.1, p 1-8, 2006. <https://doi.org/10.4314/wajae.v9i1.45676>

ZOCA, S. M.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A.; ALVES, A. R.; OLIVEIRA NETO, L.; MARTINS, M. M. Coffee processing residues as a soil potassium amendment. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v.3, p.155–165, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40093-014-0078-7>.

Recebido em: 28/03/2022

Aprovado em: 16/01/2023