

ACÚMULO DE ZINCO E CRESCIMENTO DE PLANTAS DE MILHO CULTIVADAS EM AMBIENTE CONTROLADO SOB DIFERENTES DOSES DE FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO LENTA

ARTHUR ROHRIG RABASSA¹; MILENE LOPES DOS SANTOS²; NATIEL BRAGA FURTADO²; CRISTIANE AMANDA DE OLIVEIRA²; MARCIO NUNES CORRÊA²; ELIZA ROSSI KOMNINOU³

¹Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Medicina Veterinária, Núcleo de Pesquisa, Ensino e Extensão em Pecuária (NUPEEC HUB) – arthur.r.rabassa@gmail.com;

²Universidade Federal de Pelotas, Núcleo de Pesquisa, Ensino e Extensão em Pecuária (NUPEEC HUB)- nupeecmidias@gmail.com;

³Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Clínicas Veterinárias, Núcleo de Pesquisa, Ensino e Extensão em Pecuária (NUPEEC HUB)- elizarossikom@gmail.com

1. DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

Detalhamento do Produto/Serviço: Este projeto descreve a concepção e a validação agrônômica de um protótipo físico de fertilizante de zinco (Zn) de liberação lenta (slow-release). No manejo agrícola de micronutrientes, os fertilizantes solúveis de mercado, como o sulfato de zinco, costumam liberar a totalidade do metal de forma instantânea ao entrarem em contato com o solo hídrico. Esse comportamento excede a demanda inicial das plântulas de milho em fases vegetativas iniciais, favorecendo a fixação química improdutiva nos óxidos e argilas do solo ou perdas por lixiviação em solos de textura arenosa (Li et al., 2025). O protótipo proposto utiliza um revestimento físico biodegradável estruturado para restringir a dissolução iônica acelerada. Esse material atua como um regulador controlando a disponibilidade do zinco temporalmente, protegendo o micronutriente contra perdas precoces e prolongando sua presença útil.

Diferenciais: O diferencial competitivo do protótipo reside no controle de liberação do metal, reduzindo o risco de queima radicular e fitotoxicidade em plântulas no estágio vegetativo inicial. Além do benefício puramente agrônômico, a inovação destaca-se pelo uso de materiais biodegradáveis na sua composição, em oposição aos fertilizantes revestidos comerciais tradicionais. Estes últimos costumam utilizar polímeros sintéticos resistentes que não se decompõem no solo, gerando resíduos microplásticos acumulados de longo prazo na matriz terrestre. O revestimento biodegradável do protótipo decompõe-se naturalmente de forma ecológica pelos micro-organismos locais.

2. ANÁLISE DE MERCADO

Público-alvo: O público-alvo principal é formado por produtores de grãos altamente tecnificados, com ênfase na cultura do milho (*Zea mays*), cuja lavoura demanda enriquecimento nutricional e biofortificação agrônômica eficiente com zinco. No segmento *Business to Business* (B2B), figuram indústrias produtoras e distribuidoras de fertilizantes especiais interessadas no licenciamento da tecnologia de revestimento biodegradável para diversificação de seus portfólios comerciais.

Concorrentes: Os concorrentes de mercado são as fontes solúveis tradicionais (como o sulfato de zinco), as formulações de micronutrientes de aplicação foliar e os fertilizantes revestidos comerciais baseados em polímeros sintéticos. Os adubos solúveis convencionais possuem baixo custo de aquisição inicial, mas operam com

baixa eficiência real de aproveitamento pelo solo. A adubação foliar sucessiva demanda repetidas operações mecânicas que elevam custos de combustível e mão de obra, enquanto as barreiras poliméricas sintéticas comerciais causam degradação ecotoxicológica residual no ecossistema do solo.

3. ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Modelo de Negócios: A estratégia comercial apoia-se no licenciamento do método de fabricação e revestimento para indústrias do setor de agroquímica e bioinsumos (B2B), mediante o recebimento de royalties proporcionais ao volume produzido. Isso viabiliza o escalonamento rápido da inovação através dos canais de mercado consolidados dos parceiros comerciais, reduzindo a demanda por investimentos elevados em ativos fabris por parte da equipe proponente.

Etapas de Desenvolvimento: O desenvolvimento envolveu a caracterização física do protótipo e sua validação de segurança biológica em cultivo *indoor*. Previamente, foi realizado um teste de germinação em germinadora hidropônica com 100 sementes de milho (*Zea mays*) à temperatura de 25 °C, com aspersão hídrica a cada 12 horas, registrando-se 96% de taxa de germinação em 5 dias (Roversi et al., 2008). O cultivo experimental ocorreu em sala climatizada com temperatura média controlada de 24 ± 4 °C por termômetro digital. Foram utilizados 14 vasos autoirrigáveis (40,0 x 14,0 x 15,5 cm) com reservatório hídrico de 1,5 L (mantidos com mais de 50% de sua capacidade), contendo solo com 18% de argila da classe 4. Adotou-se o espaçamento de 5 cm, com 5 sementes por vaso. Os tratamentos testados foram o protótipo de fertilizante de liberação lenta aplicado em três doses equivalentes de zinco/há: 5 kg/ha, 9 kg/ha e 12 kg/ha em duplicata; controle positivo de fertilizante de zinco comercial altamente solúvel aplicado nas mesmas doses, também em duplicata e; controle negativo sem aplicação de zinco. Utilizou-se lâmpada *full spectrum* posicionada a 1 metro de altura para fornecer 1000 lumens por 6 horas diárias (Freitas Mafort et al., 2024). As plântulas começaram a emergir no sexto dia, obtendo-se de 3 a 5 unidades em cada vaso sendo a altura de cada mensurada diariamente com régua. Aos 30 dias de semeadura, o experimento foi encerrado ao se observar início da senescência. A parte aérea das plântulas foi coletada, seca em estufa a 55 °C por 72h e analisada para concentração de zinco por espectrometria de absorção atômica em chama (FAAS) no Laboratório de Química Forense da UFPEL (Oreste et al., 2013; Antunes et al., 2021).

TRL: A tecnologia classifica-se atualmente no nível TRL 4 (Validação de componentes e protótipo em ambiente de laboratório/casa de vegetação), pois o protótipo físico integrado foi testado e validado em interação direta com um sistema biológico ativo (milho) sob parâmetros controlados de simulação agrônômica e monitoramento analítico preciso por FAAS. Os resultados obtidos nesta fase podem ser vistos na Tabela 1, como por exemplo a dose de 12 kg/ha não ter apresentado toxicidade.

Tabela 1. Altura final média e acúmulo de zinco na parte aérea das plântulas de milho cultivadas sob diferentes tratamentos e doses de fertilização de liberação lenta aos 30 dias de semeadura.

Tratamento	Altura final (cm)	±EPM	Acúmulo de zinco (mg/kg-1)	±EPM
------------	----------------------	------	-------------------------------	------

Controle 0 kg/ha	39,75 ^a	0,44	92,29 ^d	14,86
Controle 5 kg/ha	40,17 ^a	0,45	197,90 ^c	14,86
Controle 9 kg/ha	39,60 ^a	0,47	377,25 ^b	14,86
Controle 12 kg/ha	39,96 ^a	0,45	504,00 ^a	14,86
Protótipo 5 kg/ha	37,01 ^b	0,55	95,43 ^d	14,86
Protótipo 9 kg/ha	39,91 ^a	0,49	80,51 ^d	14,86
Protótipo 12 kg/ha	40,16 ^a	0,47	101,46 ^d	14,86
Valor de p	0,0003		<0,0001	

a,b,c,d Letras diferentes indicam diferença estatística significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey (p<0,05).EPM: Erro padrão de média.

Desafios e Riscos: Os principais desafios consistem na taxa de degradação biológica frente a variações bruscas de condições do solo. Como mitigação de riscos, prevê-se o ajuste de formulação do revestimento biodegradável e a condução futura de ensaios em escala piloto de campo (transição para TRL 5) sob diferentes solos regionais.

4. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTO

Impacto Social ou Ambiental: Do ponto de vista ambiental, o protótipo de liberação lenta atua otimizando o aproveitamento iônico do zinco, o que restringe perdas por lixiviação para aquíferos subterrâneos e o aporte de polímeros sintéticos residuais não degradáveis na matriz edáfica. Em termos sociais e de saúde pública, a tecnologia apoia a estratégia de biofortificação agrônômica, possibilitando a colheita de grãos mais ricos em zinco de forma segura e econômica para a alimentação humana e animal (Govil et al., 2024)

Projeções Financeiras: Embora o protótipo de fertilizante apresente maior custo unitário de fabricação do que as fontes solúveis brutas devido ao processo de revestimento físico, a eficiência real de uso do zinco pelas plantas possibilita otimizar as dosagens totais necessárias. Além disso, a eliminação de intervenções sucessivas com adubações foliares reduz despesas operacionais com maquinário, combustível e mão de obra, promovendo lucratividade para o produtor rural.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do cultivo *indoor* validaram a segurança biológica e o controle físico de liberação promovido pelo protótipo. Primeiramente, comprovou-se que a aplicação da dose elevada de 12 kg de Zn/ha através do fertilizante slow-release é perfeitamente viável e segura para o desenvolvimento inicial do milho, não induzindo danos fitotóxicos. A altura final média das plantas que receberam essa dose foi estatisticamente equivalente à do controle comercial altamente solúvel nas mesmas dosagens e à do controle negativo sem zinco. Este resultado contraria as indicações da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo (2016) que apontam a dose de 5 kg/ha como o limite tolerado pela cultura do milho antes do aparecimento de fitotoxicidade, revelando que a barreira física do protótipo possibilita um manejo seguro de maiores teores de zinco no solo. Além disso, o acúmulo de zinco nos tecidos foliares das plantas que receberam o protótipo foi expressivamente menor

em todas as doses em comparação com as plantas expostas ao controle solúvel comercial nas doses de 9 e 12 kg/ha. A dosagem de zinco comprova que a barreira física de revestimento foi eficiente em retardar a liberação e solubilização imediata do zinco no substrato durante o primeiro mês de cultivo. Ainda, o fato de essa liberação inicial controlada não ter prejudicado de forma significativa a altura das plantas, demonstra que plântulas de milho possuem baixa demanda metabólica imediata por zinco nos primeiros 30 dias de desenvolvimento vegetativo, confirmando que a liberação lenta promovida pela barreira é adequada para conservar o micronutriente no solo para os estágios subsequentes de máxima exigência metabólica.

Chamada para Ação: Diante da comprovação da segurança biológica e do controle de dissolução mecânica em escala laboratorial (TRL 4), busca-se estabelecer colaborações técnicas e comerciais com indústrias agroquímicas e produtoras de adubos interessadas no codesenvolvimento industrial do produto e na validação do seu comportamento agrônomo em ensaios piloto de campo (transição para TRL 5 e 6).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, B. F.; OTERO, D. M.; BONEMANN, D. H.; RIBEIRO, A. S.; JACQUES, A. C.; ZAMBIAZI, R. C. Evaluation of physicochemical, bioactive composition and profile of fatty acids in leaves of different olive cultivars. *Revista Ceres*, v. 68, n.6, p. 511-520, 2021.
- FREITAS MAFORT, G.; RIBEIRO, S. F.; MARTELINE, A. E. R.; ARAUJO, G. L.; RODRIGUES, W. N. Avaliação precoce da sensibilidade ao alumínio de híbridos de milho empregando teste de germinação. **Pensar Acadêmico**, v. 22, n. 5, p. 485-501, 2024.
- GOVIL, S. et al. Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 219, p. 119160, 2024.
- LI, M. et al. Zinc oxide nanoparticles coupled biochar-based slow-release fertilizer for enhanced nutrient efficiency and sustainable agriculture. **Industrial Crops & Products**, Amsterdam, v. 232, p. 121265, 2025.
- ORESTE, E. Q.; de JESUS, A.; de OLIVEIRA, R. M.; da SILVA, M. M.; VIEIRA, M. A.; RIBEIRO, A. S. New design of cold finger for sample preparation in open system: Determination of Hg in biological samples by CV-AAS. **Microchemical Journal**, v. 109, p. 5-9, 2013.
- ROVERSI, T., de MENEZES, N. L.; dos SANTOS, O. S.; FRANZIN, S. M. Pré-germinação de sementes de aveia preta, milheto e milho. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v.15, n.1, p. 109-123. 2008.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Regional Sul. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre: SBSC/NRS, 2016. 376 p.
- VIANA, J. S.; BRUNO, R. D. L. A.; de OLIVEIRA FILHO, J. O. T.; da SILVA NETO, L. D. F.; de SOUZA, C. Emergência e crescimento de plântulas de milho procedentes de sementes produzidas em sistemas de manejo de solo com e sem adubação mineral. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 3, p. 316-321, 2005.