

Colombo, PR / Novembro, 2025

Produto em pó e granulado à base de rejeitos da indústria de papel e celulose (dregs) para uso como corretivo de acidez do solo

Washington Luiz Esteves Magalhães⁽¹⁾, Silvia Helena Fuentes⁽²⁾, Naiane Garcia Motta⁽²⁾
Cristiane Segatto⁽²⁾, Krisle da Silva⁽¹⁾



⁽¹⁾ Pesquisadores, Embrapa Florestas, Colombo, PR. ⁽²⁾ Bolsistas CNPq, Embrapa Florestas, Colombo, PR.

Introdução

A indústria de papel e celulose é uma das mais importantes do Brasil, colocando o País como o segundo maior produtor de celulose e um dos dez maiores produtores de papel do mundo. O setor se destaca pela alta tecnologia e por sua forte atuação em diversas cadeias produtivas (Empresa de Pesquisa Energética, 2020; Indústria Brasileira de Árvores, 2021). Apesar de sua grande importância econômica, o setor também se caracteriza pela elevada geração de resíduos sólidos (Simão et al., 2018).

Dregs, grits, lama de cal e cinzas de caldeira representam uma fração significativa dos rejeitos gerados pela indústria de papel e celulose, sendo frequentemente destinados a aterros sanitários devido à ausência de rotas consolidadas de reaproveitamento (Quina; Pinheiro, 2020). Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem causar impactos ambientais expressivos, comprometendo a qualidade da água, do solo e do ar (Simão et al., 2018).

Resíduos ou subprodutos industriais como os dregs têm despertado interesse por representarem uma alternativa de baixo custo e por permitirem o reaproveitamento de materiais que, de outra forma,

seriam descartados. Seu uso pode contribuir para reduzir a pressão ambiental sobre os métodos tradicionais de disposição e sobre a exploração de recursos naturais (Farage et al., 2020).

Os dregs são resíduos sólidos de natureza alcalina, compostos majoritariamente por carbono, carbonato de cálcio, carbonato de sódio, sulfato de sódio (CaCO_3 , Na_2CO_3 e Na_2S) e traços de elementos-traço como níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb). Em função da presença de elementos com potencial para neutralizar a acidez do solo, os dregs surgem como uma alternativa viável e economicamente atrativa ao uso do calcário (Almeida et al., 2007; Farage et al., 2020). Pesquisas apontam que, devido à composição alcalina, os dregs contribuem não apenas para a neutralização da acidez, mas, também para o aprimoramento dos indicadores de fertilidade do solo (Rasa et al., 2021). Além disso, a aplicação desse resíduo em uso agrícola promove práticas mais sustentáveis de manejo, reduzindo riscos ambientais associados ao descarte em aterros e oferecendo alternativas economicamente viáveis para a correção da acidez dos solos.

No entanto, a viabilidade agronômica do uso desse resíduo depende da redução do teor de sódio,

que pode promover a dispersão de argilas, a redução de infiltração de água e a degradação estrutural do solo, caso aplicado sem tratamento prévio (Farage et al., 2020). Assim, a transformação dos dregs em produtos mais estáveis e manejáveis – como materiais em pó e granulados – demanda investigação estruturada e ainda pouco explorada, que integrem tratamento do resíduo, formulação final do produto e avaliação comparativa tanto em relação às formas físicas (pó vs. granulado) quanto agronômica em um único fluxo metodológico.

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e caracterizar produtos em pó e granulado a partir de dregs com teor reduzido de sódio, visando sua aplicação como um insumo alternativo para a correção da acidez do solo, buscando aliar viabilidade técnica, eficiência agronômica e aproveitamento sustentável de resíduos industriais.

Caracterização dos produtos

Os produtos em pó e o granulado foram gerados a partir dos dregs brutos (doação da Klabin S.A.), os quais sofreram lavagens sucessivas, deságue (previamente foi testado as variáveis de relação sólido: líquido, tempo de agitação e quantidade de lavagens) e secagem originando o que se chama de produto em pó. O produto granulado é obtido logo após o deságue dos dregs ($TU \approx 70\%$) e adição de fibras curtas de celulose ($TU \approx 70\%$) advindas do processo industrial de reciclagem de papelão, seguida de granulação e secagem.

O baixo percentual de sódio e o potencial de correção da acidez do solo foram as principais variáveis avaliadas por meio de diversas caracterizações e ensaios conforme descritos adiante.

Previvamente à análise, realizou-se a abertura da amostra com Água Régia ($HCl:HNO_3 = 3:1$) conforme ISO 11466 (1995): a solução foi adicionada ao dregs na proporção de 1:100 (sólido:líquido) por 28 horas em temperatura ambiente e sob agitação. Depois foi filtrado à vácuo em filtro de placa poroso nº 2 e o filtrado foi transferido para um balão volumétrico de 250 mL e avolumado. Após, foram realizadas as diluições necessárias para as análises no cromatográfico iônico.

Para a medição dos cátions totais (sódio, potássio, magnésio e cálcio) utilizou-se a técnica de cromatografia iônica (CI) no equipamento ICS-5000 (Thermo Scientific), equipado com uma pré-coluna CG12A (4 x 50 mm) e uma coluna de separação CS12A (4 x 250 mm, Thermo Scientific). O volume de amostra injetado foi 25 μL e o eluente foi uma

solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 22 mM, em modo isocrático, ou seja, para a separação dos compostos é utilizada uma composição constante da fase móvel durante toda a análise. A detecção foi realizada por condutividade, com o auxílio de uma supressora autorregeneradora de cátions CDRS 600 (4 mm, Thermo Scientific). A temperatura do forno da coluna foi mantida em 30 °C durante as separações e a temperatura da célula de condutividade em 25 °C. Os resultados foram obtidos aplicando-se a Equação 1.

$$\text{Cátion} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{(\text{leitura} * \text{FD} * \text{VI})}{(\text{peso}/1.000)} \quad \text{Equação 1}$$

em que

Leitura = informação fornecida pelo equipamento (mg/L).

FD = fator de diluição.

VI = volume inicial (mL)

peso = quantidade de amostra (g) e 1.000 = correção de unidade.

A área superficial específica ($m^2 g^{-1}$) serviu para avaliar a reatividade superficial do produto em pó (dregs lavados), a qual foi determinada usando-se o método BET (Brunauer-Emmett-Teller) (Thommes et al., 2015) pela técnica de multiponto (região 0,05 a 0,35) e a distribuição dos poros foi avaliada pelo método BJH (Barrett, Joyner e Halenda) (Thommes et al., 2015). Ambas as análises foram realizadas pela adsorção de nitrogênio sob temperatura aproximada de 77 K, utilizando o equipamento Surface Area & Pore Siza Analyzer – NOVA 1200e (Quantachrome Instruments). A amostra foi submetida previamente à degaseificação por 3h sob temperatura de 100 °C.

A caracterização micromorfológica do produto em pó foi realizada a partir do microscópio eletrônico de varredura (MEV), Shimadzu SSX 550, o qual utiliza um filamento de tungstênio como fonte de elétrons, conduzido por um sistema de alto vácuo, com uma diferença de potencial de 30 kV e magnificação de 300.000 vezes. As amostras foram recobertas com ouro, depositado pelo metalizador e sob vácuo (SC 701 Quick Coater – Sanyu).

Para determinar o potencial Zeta das amostras, foi utilizado o equipamento ZETA POTENTIAL ANALYZER modelo Nicomp Nano Z3000 DLS, que se baseia no princípio do espalhamento dinâmico de luz (DLS - Dynamic Light Scattering). As análises foram

realizadas em meio aquoso com pH 10 e 7, em temperatura ambiente e índice de refração da água de 1.33.

O difratômetro de raio-X Shimadzu modelo XRD-6000 foi utilizado para analisar a estrutura cristalina dos dregs. A análise ocorreu com radiação Cu-K α , tensão de 30 kV e corrente de 30 mA, passo angular de 0,02° com ângulo de 2 θ variando de 10° a 80°. A velocidade de varredura foi 1°/min. Para suavizar os ruídos, o difratograma foi suavizado pelo método Savitzky-Golay.

A análise termogravimétrica foi realizada no equipamento SDT (Q600, TA Instruments®). O comportamento do material mediante o aumento gradual de sua temperatura foi analisado iniciando-se em 18 °C indo até 1.000 °C com uma rampa de aquecimento de 10 °C/min. Para o início da análise, a amostra foi colocada em uma panelinha de alumínio. A análise foi realizada na presença de uma atmosfera controlada com nitrogênio (N₂), com vazão de 50 mL min⁻¹.

Testes agronômicos

Todos os testes agronômicos foram realizados na Embrapa Florestas.

Ensaio de percolação

O solo utilizado foi coletado da área experimental da Embrapa Florestas, ou seja, solo de floresta de eucalipto, referente à camada de 0,0 – 0,6 m. O solo foi peneirado em malha 0,05 mm e classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (Bhering et al., 2009). Uma amostra deste solo foi coletada e encaminhada para a caracterização química em laboratório terceirizado (AgriSolum – Análises Agronômicas – Maringá, PR). O solo apresentou pH CaCl₂: 4,20; MO%: 4,47; C: 25,96 (g dm⁻³); Al: 1,68 cmolc dm⁻³; H + Al: 12,13 cmolc dm⁻³; Ca: 1,30 cmolc dm⁻³; Mg: 1,10 cmolc dm⁻³; K: 0,13 cmolc dm⁻³; P: 2,40 mg dm⁻³; SB: 2,53 cmolc dm⁻³; CTC: 14,66 cmolc dm⁻³; CTC_{efetiva}: 4,21 cmolc dm⁻³; V%: 17,26 e m%: 39,90.

As condições experimentais foram estabelecidas empregando-se o método de planejamento experimental contando com duas variáveis: testemunha (sem uso de dregs) e o produto granulado, em quadruplicata. A dose empregada foi a calculada para elevar o pH do solo para 6,0; o cálculo foi realizado a partir das equações obtidas das análises de variação de doses versus pH. Na Tabela 1 está descrita a dose do produto em tonelada por hectare.

Tabela 1. Descrição da dose do produto granulado para aumentar o pH para 6,0.

Produto	Dose t ha ⁻¹ (pH _{6,0})
Testemunha	0
Produto granulado	11,3

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de percolação e construídas a partir de copo com capacidade de 700 mL, área de 0,004 m² e, ao fundo da coluna, colocou-se uma manta de tecido não tecido (TNT) para impedir o arraste de partículas de solo. Foram realizados furos para permitir a saída gravitacional da solução percolada diretamente para os frascos de coleta. Para cada copo, 500 g de solo foram adicionados e, para deixar em capacidade de campo, foi adicionado 150 mL de água deionizada.

Iniciou-se a aplicação de água deionizada sobre os copos de percolação. Este procedimento foi repetido três vezes por semana, até totalizar nove percolações. Em cada percolação, usou-se 200 mL de água por copo, totalizando 1.800 mL por coluna durante todo o período experimental. A água percolada foi identificada, armazenada e analisada. As variáveis analisadas foram: pH em CaCl₂ e teores totais de cálcio, magnésio, sódio e potássio por meio da técnica de cromatografia iônica, conforme metodologia descrita anteriormente.

Ensaio de incubação

O experimento de incubação foi conduzido em phytotron, câmara de pesquisa de ambiente controlado, sob delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições. Foram utilizados vasos com capacidade de 5 kg, preenchidos com o mesmo solo do experimento de percolação mencionado anteriormente. Os tratamentos consistiram em: testemunha (T) (somente solo), calcário calcítico (CC), produto granulado (PG) e o produto em pó (PP). A quantidade de corretivo adicionada a cada vaso foi determinada com base na necessidade de calagem do solo, considerando o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) de cada material. Após a incorporação dos corretivos, os vasos foram mantidos em repouso por 30 dias, sob controle rigoroso de temperatura, umidade e fotoperíodo.

A umidade do ambiente foi ajustada para 55%. Para tanto, o solo recebeu reposição hídrica três vezes por semana. O regime térmico adotado no phytotron seguiu a seguinte variação diária: 18 °C

das 00h às 05h e das 19h às 23h, 19 °C das 06h às 08h e das 16h às 18h, 20 °C das 09h às 16h. A exposição à luz ocorreu das 06h às 17h (11 horas de exposição).

Resultados e discussão

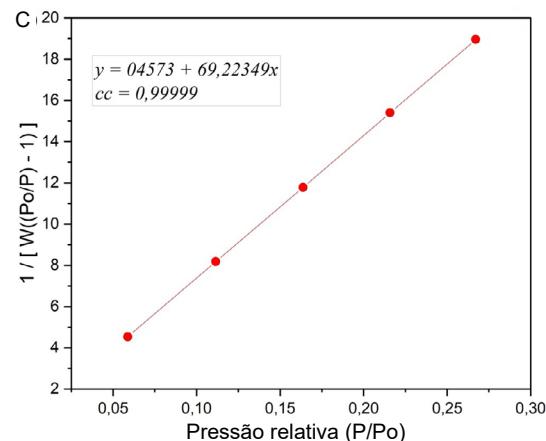
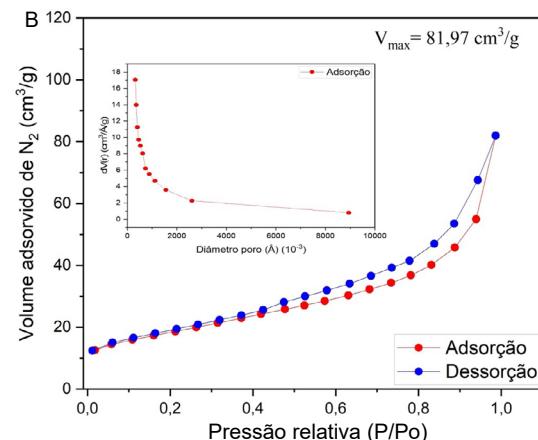
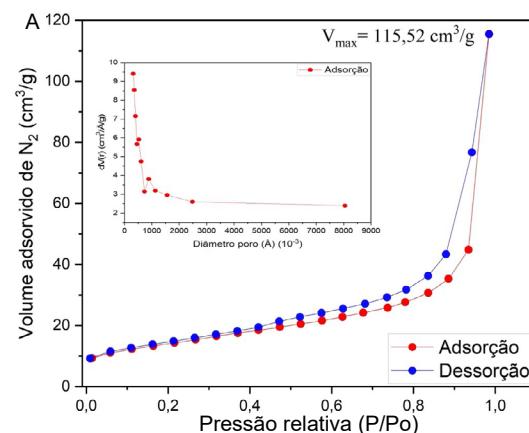
A Tabela 2 mostra que o processo de obtenção do produto em pó foi eficiente na remoção do sódio, devido à diminuição de 68,56% em relação à matéria-prima original (dregs) e ficou com menos de 2%, conforme estabelece a Instrução Normativa nº 39 (Brasil, 2018). Para os demais elementos a remoção ocorreu em percentuais bem menores. O principal elemento nos dregs e no produto em pó é o cálcio. Isso ocorre porque os dregs são gerados na etapa de caustificação do processo kraft onde é adicionado óxido de cálcio (Foelkel, 2011) e o produto em pó manteve 85,24% do cálcio presente nos dregs. A elevada concentração de cálcio não alterou a relação Ca:Mg que se manteve baixa, o que é benéfico, pois, o uso de insumos com elevada relação destes nutrientes, especialmente em ambientes com baixa disponibilidade de magnésio, pode induzir à sua deficiência nas plantas. Tal efeito está associado à competição iônica entre Ca^{2+} e Mg^{2+} pelos sítios transportadores, o que compromete a eficiência na absorção de Mg mesmo quando este se encontra presente no solo (Ferreira et al., 2023).

Tabela 2. Determinação dos cátions totais Na^+ , K^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} (mg g^{-1}) e a relação Ca:Mg na matéria-prima (dregs) e no produto em pó.

Amostra	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	$\text{Ca}^{2+}: \text{Mg}^{2+}$
Dregs	59,67	6,91	41,56	132,38	3,19
Produto em pó	18,76	4,12	36,51	112,84	3,09

Os resultados obtidos para as isotermas de adsorção e dessorção de nitrogênio para os dregs e o produto em pó (Figura 1) são compatíveis com a isoterma do tipo IV com um laço de histerese do tipo H3, conforme IUPAC (2015). Os valores de diâmetro médio (Tabela 3) e a distribuição de poros observada no detalhe da Figura 1 para os dregs (Figura. 1A) e para o produto em pó (Figura. 1B), confirmam que as isotermas são do tipo IV, ou seja, evidenciam perfis típicos de sólidos mesoporosos (20 Å – 500 Å). O laço tipo H3 é característico de sistemas porosos compostos por uma combinação de micro, meso e macroporos. Esse perfil de histerese está comumente associado à presença de agregados de partículas não rígidas, predominantemente em

forma de placas, os quais originam poros do tipo fenda, características concordantes com a estrutura de materiais lamelares, nos quais a organização das camadas favorece a formação desse arranjo poroso (Thommes et al., 2015). Tal comportamento é consistente com as estruturas morfológicas observadas nas micrografias eletrônicas (Figura 2).



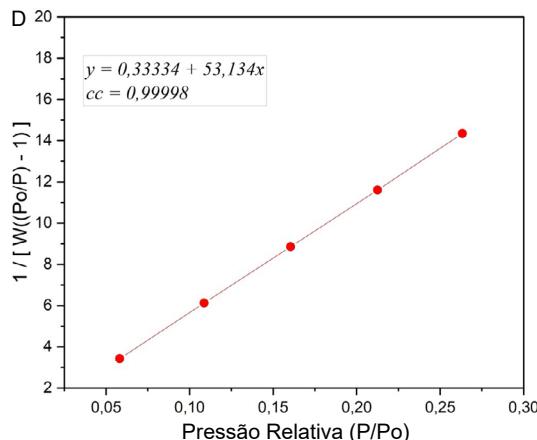


Figura 1. Isotermas de adsorção/dessorção da matéria-prima (dregs) (A) e do produto em pó (B). Equações BET linearizadas, gráfico e coeficiente de correlação (cc) para os dregs (C) e o produto em pó (D).

Ambas as isotermas apresentaram baixo volume adsorvido sob baixas pressões relativas devido à ausência de microporos, conforme observado nos destaque da Figura 1A-B. Próximo à $P/P_o \approx 1$, no entanto, observa-se um aumento abrupto do volume adsorvido, associado ao preenchimento completo dos poros e à contribuição de macroporos, em especial nos dregs (Figura. 1A). Nota-se também que os dregs adsorveram em torno de 41% mais N_2 (V_{max}) sob altas pressões ($P/P_o \approx 1$) do que o produto em pó (Figura. 1A-B, respectivamente). Isso pode ser explicado pelo maior volume total de poros acessíveis nos dregs, como observado na Tabela 3. Além disso, a histerese mais aberta, sob altas pressões, observada nos dregs (Figura 1A), sugere mesoporos relativamente cilíndricos uniformes ou cavidades conectadas por gargalos largos. Por outro lado, a histerese do produto em pó (Figura 1B) é mais suave, o que pode estar relacionado a uma distribuição de tamanho de poros mais heterogênea e à presença de gargalos estreitos que dificultam o esvaziamento durante a dessorção.

As retas obtidas após o ajuste dos dados experimentais e as respectivas equações e coeficientes de correlação (Figura C-D e Tabela 4) mostram que as faixas de linearidade das retas validam a aplicação deste modelo nas isotermas de adsorção/dessorção de N_2 , para as amostras de dregs e do produto em pó, visto que a faixa de pressão relativa (região de linearidade) usada para determinar os coeficientes na equação BET (0,058 à 0,26) está dentro do intervalo de linearidade aceito para o modelo BET em sistemas adsorvente/adsorvente, o qual varia de 0,05 a 0,35.

A Tabela 3 mostra que a área específica do produto em pó aumentou em aproximadamente 30% após as lavagens. Em adição, houve uma redução

no volume total e no diâmetro médio dos poros do produto em pó em comparação aos dregs.

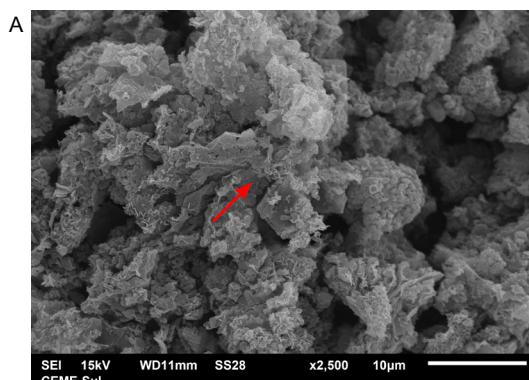
Tabela 3. Área superficial, volume total e diâmetro médio dos poros da matéria-prima (dregs) e do produto em pó.

Amostra	Área superficial $m^2 g^{-1}$ (Método BET)	Volume total do poro ($cm^3 g^{-1}$) (Método BJH)	Diâmetro médio do poro (\AA)
Dregs	49,98	0,165	31,97
Produto em pó	65,14	0,107	30,66

Tabela 4. Parâmetros da Equação de BET linearizada para as isotermas de adsorção dos dregs e do produto em pó e respectivos coeficientes de correlação.

Amostra	Declive da reta (cm^3/g)	Coeficiente linear da reta (cm^3/g)	Coeficiente de correlação (cc)
Dregs	$69,22 \pm 0,08$	$0,46 \pm 0,02$	0,99999
Produto em pó	$53,10 \pm 0,1$	$0,33 \pm 0,02$	0,99998

Nas imagens da Figura 2, observa-se em ambas as amostras que predomina uma morfologia irregular em formato de agregados, placas, lâminas e estruturas porosas, corroborando com a análise das isotermas. Também é possível visualizar, em menor frequência, a presença de estruturas cristalinas de geometria romboédrica, conforme mostrado pelas setas nas Figura 2A-C, as quais são características da calcita (carbonato de cálcio; $CaCO_3$) (Li et al., 2014). A presença desta estrutura cristalina é consistente com a análise de DRX. Na Figura 2B-D, observa-se que muitas dessas partículas apresentam dimensões submicrométricas, variando de poucas centenas de nanômetros até aproximadamente 1 μm em sua maior dimensão. Essa característica, aliada à presença de porosidade, sugere que o material possui grande potencial reativo, devido à maior quantidade de sítios ativos disponíveis para reações de troca de íons.



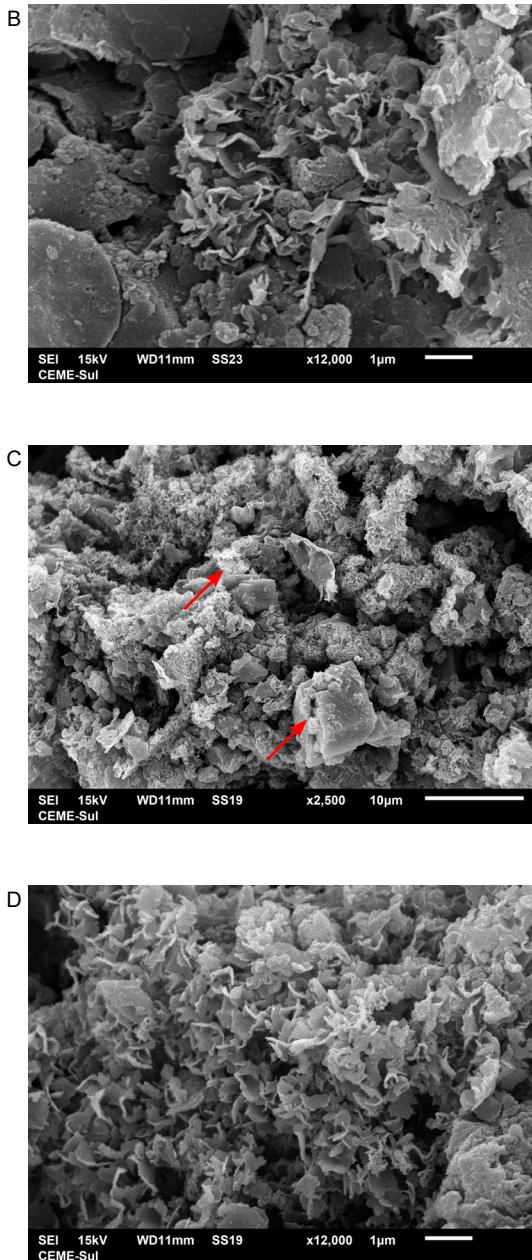


Figura 2. Morfologia do dregs (A, B) e do produto em pó (C, D) com magnitude 2.500x (A, C) e 12.000x (B, D). As setas mostram estruturas cristalinas de geometria romboédrica, típicas de calcita.

Verifica-se na Tabela 5 a distribuição acumulada do tamanho das partículas do produto em pó, que varia de 3.181 nm a 140.578 nm. Nota-se que as menores partículas, que correspondem a 3,181 µm, não expressam exatamente as dimensões submicrométricas visualizadas na Figura 2. Isso pode ser explicado devido aos baixos valores do potencial zeta (Tabela 6), os quais sugerem que o produto em pó tende a se aglomerar com facilidade, como pode ser observado na Figura 2 e no tipo de histerese mencionado anteriormente, dificultando assim a detecção individualizada das

partículas. Com relação ao pH, o produto em pó em pH 10 exibe um potencial zeta levemente negativo (-1,15 mV); enquanto em pH 7, a superfície se torna positivamente carregada (4,40 mV). Tal comportamento se deve à sua composição, a qual é composta predominantemente por carbonatos como CaCO_3 e hidróxidos como Mg(OH)_2 , que possuem ponto isoelétrico próximo ou abaixo de pH 10 e, com isso, a superfície se torna negativamente carregada em meios alcalinos (Farage et al., 2020; Zhang et al., 2020). Esse padrão de inversão de cargas superficial é relevante para aplicações agrícolas, uma vez que a presença de cargas positivas em condições de pH próximas ao neutro pode favorecer a interação com ânions presentes no solo, como fosfatos e sulfatos, enquanto a carga negativa em pH alcalino tende a reduzir a agregação de partículas, contribuindo para melhor dispersão e disponibilidade dos corretivos. Desse modo, o produto em pó apresenta potencial para uso como corretivo de solo ou insumos agrícolas, atuando na neutralização da acidez e no fornecimento de nutrientes, ao mesmo tempo em que exibe estabilidade coloidal ajustável em função do pH do ambiente.

Tabela 5. Distribuição acumulada do tamanho das partículas (nm) do produto em pó.

Amostra	25%	50%	75%	90%	99%
Produto em pó	3.181	6.310	17.753	49.834	140.578

Tabela 6. Resultados do potencial zeta (mV) para o produto em pó em diferentes pH.

Amostra	pH 10	pH 7
Produto em pó	-1,15	4,40

A análise cristalográfica por difração de raios X, mostrada na Figura 3, evidenciou que o produto em pó apresenta padrão cristalino característico da calcita (carbonato de cálcio; CaCO_3), com pico principal em 29,4° e picos secundários coincidentes com o padrão de referência (PDF 05-0586). Esse resultado confirma que a calcita constitui a fase majoritária dos dregs, o que reforça o seu potencial como corretivo de acidez dos solos, devido ao elevado teor de carbonato de cálcio presente. Logo, de acordo com o resultado obtido, o tratamento aplicado aos dregs não compromete a estrutura cristalina da calcita, portanto, preservando suas propriedades agronômicas e apontando o resíduo como alternativa viável para uso como insumo corretivo.

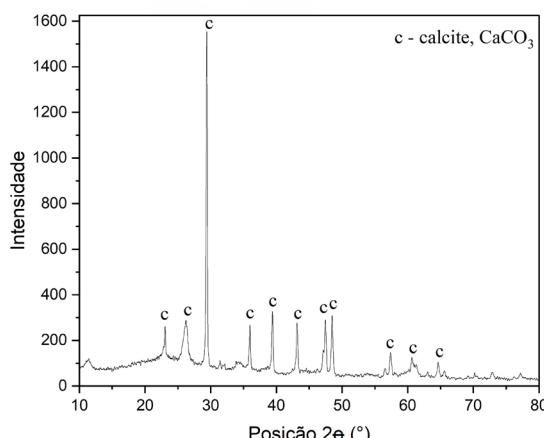


Figura 3. Difratograma vde raios X do produto em pó com indicativo do padrão cristalográfico da fase calcita (CaCO_3 ; c).

O perfil termogravimétrico do produto em pó (Figura 4) evidencia quatro principais eventos de perda de massa. Inicialmente, a perda de massa (3,84%) verificada até 250 °C é atribuída à evaporação de água adsorvida e à umidade livre. Em seguida, observa-se um trecho longo com perda gradual de massa entre 250 °C e 570 °C, provavelmente associada à oxidação de traços orgânicos e, sobretudo, à desidroxilação de hidróxidos como $\text{Mg}(\text{OH})_2$ e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formando MgO e CaO , respectivamente (Beaudoin et al., 2006; Nahdi et al., 2009). Os eventos seguintes ocorrem sob temperaturas entre 570 °C e 786 °C, com queda de massa de 22,45% e 14,71% com picos intensos de DTG sob temperaturas de 664 °C e 768 °C, respectivamente. A decomposição térmica compreendida neste intervalo de temperatura é majoritariamente devida à presença de carbonatos como, por exemplo, na descarbonatação do CaCO_3 $\text{CaO} + \text{CO}_2$ (Adesanya et al., 2025; Zhuang et al., 2025). O patamar final de ≈ 42%, sugere resíduo rico em óxidos (CaO/MgO) e fases inertes após a liberação de CO_2 do carbonato dominante, bem como compostos carbônicos.

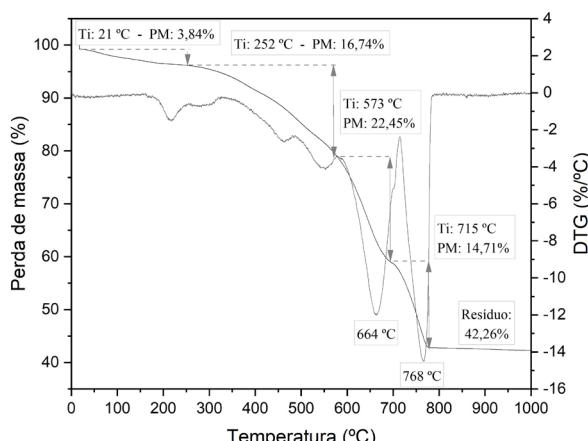


Figura 4. Análise termogravimétrica do produto em pó.

Ensaio de percolação

A Figura 5 mostra os resultados do ensaio de percolação evidenciando diferenças entre a testemunha e o tratamento com o produto granulado (PG). Enquanto o pH da solução percolada da testemunha se manteve relativamente estável ao longo das nove coletas, variando entre 5,21 e 6,07, o produto granulado apresentou aumentos atingindo valores iguais ou superiores a 7,0, como ocorreu nas percolações 5 e 7. Esse comportamento evidencia a capacidade neutralizante do PG e sua eficácia como corretivo de acidez do solo.

As oscilações do pH ao longo das percolações podem estar associadas ao processo gradual de solubilização dos grânulos no solo. Essa dinâmica indica que, embora a granulação reduza a reatividade imediata, ela proporciona uma liberação mais lenta e contínua, prolongando o efeito corretivo e reduzindo perdas por lixiviação. Esse resultado sugere que o PG pode atuar não apenas como corretivo eficiente, mas, também como um insumo com entrega gradual, o que é desejável em sistemas agrícolas que demandam estabilidade química do solo ao longo do tempo.

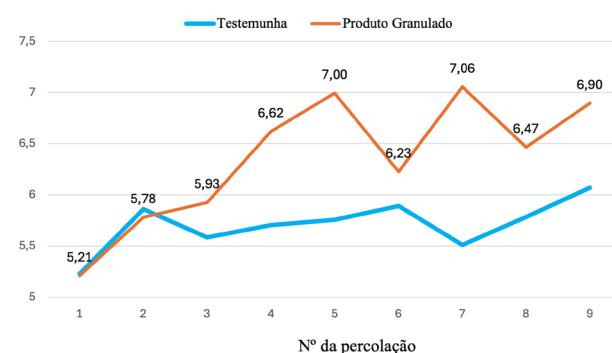


Figura 5. Variação do pH no ensaio de percolação ao longo de nove aplicações sucessivas de água deionizada.

Os resultados de percolação evidenciaram um padrão semelhante de liberação para cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+) (Figura. 6A, 6B e 6C, respectivamente), com concentrações iniciais elevadas no tratamento com produto granulado (PG), seguidas por uma redução acentuada e estabilização ao longo das aplicações subsequentes de água. Na primeira percolação, o PG apresentou valor significativamente superior em relação à testemunha, atingindo $1,5 \text{ mg mL}^{-1}$ para Ca^{2+} (cerca de três vezes maior que a testemunha), $1,5 \text{ mg mL}^{-1}$ para Mg^{2+} (também aproximadamente três vezes maior) e $0,7 \text{ mg/mL}$ para K^+ (quase três vezes o valor observado na testemunha). Esse comportamento indica a presença

de uma fração solúvel prontamente disponível dos nutrientes, liberada logo no início do processo.

A partir da segunda percolação, entretanto, houve um decréscimo expressivo nas concentrações e que passaram a se estabilizar em torno de 0,1 e 0,2 mg/mL nas etapas seguintes, mantendo os valores semelhantes aos da testemunha. Esse comportamento sugere que a maior parte do cálcio, do magnésio e do potássio solúveis foi liberada nas primeiras etapas. A liberação rápida inicial, seguida de estabilização, pode ser vantajosa em sistemas agrícolas, fornecendo nutrientes de forma imediata e, posteriormente, em doses graduais, o que é desejável em sistemas agrícolas que demandam estabilidade química do solo ao longo do tempo.

A liberação de sódio (Na^+) (Figura 6D) foi diferente daquela observada para o cálcio, magnésio e potássio. Enquanto a testemunha apresentou

valores estáveis e próximos de zero durante todo o período experimental, o PG liberou concentrações de Na^+ nas primeiras percolações, atingindo picos de 5,5 e 5,6 mg mL^{-1} na segunda e quarta percolação, respectivamente. Esse comportamento evidencia que, apesar do processo de lavagem ter reduzido significativamente o teor de sódio na matéria-prima, ainda houve uma fração solúvel residual capaz de ser rapidamente lixiviada.

Após o pico inicial, é observada uma queda, com concentrações variando entre 2,3 e 1,5 mg mL^{-1} nas últimas percolações, indicando que grande parte do Na^+ disponível foi lixiviada já nas etapas iniciais. De forma quantitativa, o sódio percolado representou cerca de 0,6% do peso total do material, considerando o volume de 1.800 mL de água aplicado durante o ensaio.

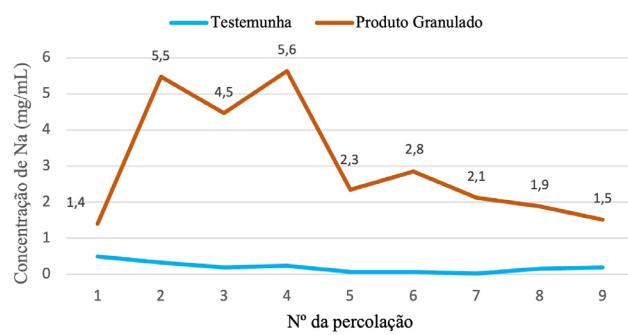
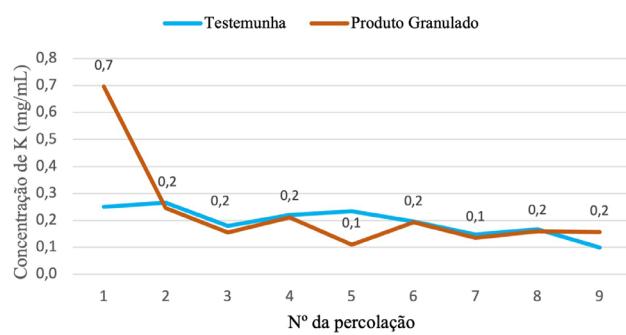
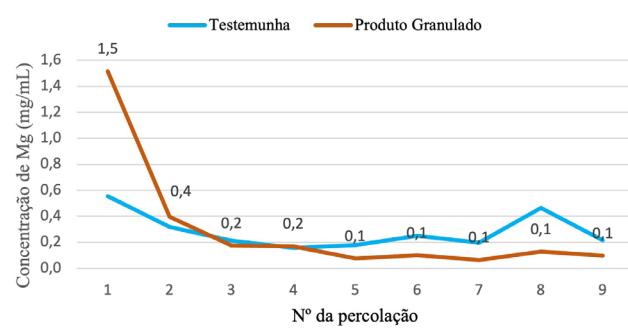
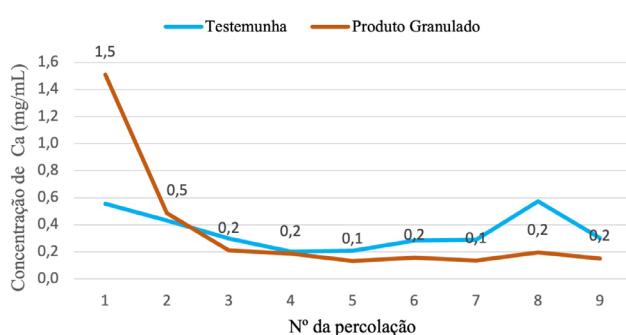


Figura 6. Variação da concentração de cátions (mg/mL) na solução percolada ao longo de nove percolações sucessivas. (A) Cálcio (Ca^{2+}), (B) Magnésio (Mg^{2+}), (C) Potássio (K^+) e (D) Sódio (Na^+).

Ensaio de incubação

O resultado de pH do ensaio de incubação (Figura 7) evidencia diferenças significativas entre os tratamentos e a testemunha quanto à capacidade de aumento do pH do solo. O uso do produto em pó (PP) resultou em maior efeito corretivo, elevando o pH para 6,16, o que corresponde a um aumento

aproximado de 47% em relação ao valor inicial, enquanto a testemunha se apresentou constante (variação de 4,2 para 4,3) dentro do período avaliado. Em seguida, o tratamento com calcário comercial (CC) atingiu pH de 5,55, representando aumento de cerca de 32%. O produto granulado (PG) também promoveu elevação expressiva, alcançando pH de 5,40 (+ 29%) em relação à testemunha.

O desempenho do PG foi ligeiramente inferior aos demais materiais em pó, o que pode estar relacionado à menor superfície específica exposta devido ao processo de granulação que reduz a velocidade de dissolução e, consequentemente, a reatividade imediata no solo.

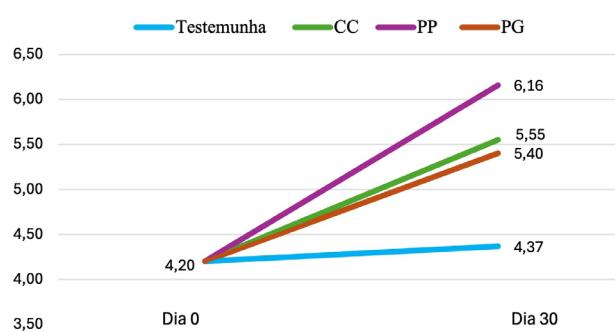


Figura 7. – Variação do pH do solo no ensaio de incubação após 30 dias.

Os tratamentos consistiram em testemunha (sem corretivo), cálculo calcítico (CC), produto em pó obtido (PP) e produto granulado (PG).

Considerações finais

Os produtos em pó e granulado provenientes dos dregs após o processo de lavagem apresentam potencial para uso como corretivo alternativo de acidez do solo. O produto em pó reagiu mais rapidamente para a elevação do pH do solo, enquanto o produto granulado apresentou aumento mais gradual do pH, característica desejável para uso agrícola. Apesar da presença residual de sódio, os valores se mantiveram dentro dos limites aceitáveis conforme norma do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa). Logo, os produtos desenvolvidos à base de dregs tornam-se uma alternativa promissora ao calcário, agregando valor a um resíduo industrial e contribuindo para práticas mais sustentáveis na agricultura.

Essa publicação apresenta aderência aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente ao ODS 12, por apresentar uma tecnologia para o uso de resíduos da indústria de polpação de celulose e transformá-lo em fertilizantes.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e pela concessão das bolsas vinculadas a este trabalho.

Referências

- ADESANYA, E. D.; MARSH, A. T. M.; YLINIEMI, J.; BERNAL, S. A. Co-calcination of kaolinitic clay and green liquor dregs to produce supplementary cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, v. 22, p. e04520, 2025.
- ALMEIDA, H. C.; ERNANI, P. R.; MARIN, H. H.; ESCAPINI, E. H., MECABÔ JÚNIOR, J. Influência da adição de um resíduo industrial alcalino na velocidade de saturação da acidez do solo, adsorção de sódio e disponibilidade de magnésio para o trigo. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 6, p. 104-113, 2007.
- BEAUDOIN, J. J.; SATO, T.; TUMIDAJSKI, P. The Thermal decomposition of Ca(OH)₂ polymorphs. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN CONCRETE THROUGH SCIENCE AND ENGINEERING, 2., Québec, 2006. [Proceedings...]. S.n. : s.l., 2006. p. 1-15. Disponível em: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=bedec8af-029a-4fe9-96e3-55790cfbb648>. Acesso em: 28 ago. 2025.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018*. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-39-2018-fertil-minerais-versao-publicada-dou-10-8-18.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **BEM 50 anos**. [2020]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/ben-50-anos>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- FARAGE, R. M. P.; QUINTA, M. J.; GANDO-FERREIRA, L.; SILVA, C. M.; SOUZA, J. J. L. L.; TORRES, C. M. M. E. Kraft pulp mill dregs and grits as permeable reactive barrier for removal of copper and sulfate in acid mine drainage. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 2020.
- FERREIRA, L. S.; OLIVEIRA, V. S.; MARCHIORI, J. J. P.; FERREIRA T. The nutrient magnesium in soil and plant: a review. *International Journal of Plant & Soil Science*, v. 35, n. 8, p. 136-144, 2023.
- FOELKEL, C. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose kraft de eucalipto. Parte 05: resíduos minerais. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, 2011.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **2021**: relatório anual IBÁ = IBÁ anual report. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/05/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2025.

LI, T.; SUI, F.; LI, F.; CAI, Y.; JIN, Z. Effects of dry grinding on the structure and granularity of calcite and its polymorphic transformation into aragonite. **Powder Technology**, p. 338-343, 2014.

NAHDI, K.; ROUQUEROL, F.; TRABELSI AYADI, M. Mg(OH)2 dehydroxylation: A kinetic study by controlled rate thermal analysis (CRTA). **Solid State Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1028-1034, 2009.

QUINA, M. J.; PINHEIRO, C. T. Inorganic waste generated in kraft pulp mills: the transition from landfill to industrial applications. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072317>.

RASA, K.; PENNANEN, T.; PELTONIEMI, K.; VELMALA, S.; FRITZE, H.; KASEVA, J.; JOONA, J.; UUSITALO, R. Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility. **Journal of Environmental Quality**, v. 50, n. 1, p. 172-184, 2021.

SIMÃO, L.; HOTZA, D.; RAUPP-PEREIRA, F.; LABRINCHA, J. A.; MONTEDO, O. R. K. Wastes from pulp and paper mills: a review of generation and recycling alternatives. **Ceramica**, v. 64, n. 371, p. 443-453, 2018.

THOMMES, M.; KANEKO, K.; NEIMARK, A.; OLIVIER, J. P. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v. 87, n. 9-10, p. 1051-1069, 2015.

ZHANG, L.; MISHRA, D.; ZHANG, K.; PERDICAKIS, B.; PERNITSKY, D.; LU, Q. Electrokinetic study of calcium carbonate and magnesium hydroxide particles in lime softening. **Water Research**, v. 186, 2020.

ZHUANG, D.; CHEN, Z.; SUN, B. Thermal decomposition of calcium carbonate at multiple heating rates in different atmospheres using the techniques of TG, DTG, and DSC. **Crystals**, v. 15, n. 2, p. 108, 2025.

Embrapa Florestas
Estrada da Ribeira, Km 111, Guaraituba
Caixa Postal 319
83411-000 Colombo, PR
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
Presidente: *Patrícia Póvoa de Mattos*
Vice-presidente: *José Elidney Pinto Júnior*
Secretária-executiva: *Elisabete Marques Oaida*
Membros: *Annette Bonnet, Cristiane Aparecida Fioravante Reis, Elene Yamazaki Lau, Guilherme Schnell e Schühli, Luis Claudio Maranhão Froufe, Marina Moura Morales, Paulo Marcelo Veras de Paiva e Sandra Bos Mikich*

Comunicado Técnico 520
ISSN 1517-5030 / e-ISSN 1980-3982
Novembro, 2025

Edição executiva e revisão de texto: *José Elidney Pinto Júnior*
Normalização bibliográfica: *Francisca Rasche (CRB-9/1204)*
Projeto gráfico: *Leandro Sousa Fazio*
Diagramação: *Celso Alexandre de O. Eduardo*

Publicação digital: PDF



Ministério da
Agricultura e Pecuária

Todos os direitos reservados à Embrapa.