

## **BARRAGENS HIDROELÉTRICAS: GESTÃO FINANCEIRA E USO AGRÍCOLA DE BIOMATERIAIS: POTENCIAL DO CARBONATO DE CÁLCIO ( $\text{CACO}_3$ ) DO MEXILHÃO DOURADO LIMNOPERNA FORTUNEI NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO**

## **HYDROELECTRIC DAMS: FINANCIAL MANAGEMENT AND AGRICULTURAL USE OF BIOMATERIALS: POTENTIAL OF CALCIUM CARBONATE ( $\text{CACO}_3$ ) FROM THE GOLDEN MUSSEL LIMNOPERNA FORTUNEI IN NEUTRALIZING SOIL ACIDITY**

## **PRESAS HIDROELÉCTRICAS: GESTIÓN FINANCIERA Y USO AGRÍCOLA DE BIOMATERIALES: POTENCIAL DEL CARBONATO DE CALCIO ( $\text{CACO}_3$ ) DEL MEJILLÓN DORADO LIMNOPERNA FORTUNEI PARA NEUTRALIZAR LA ACIDEZ DEL SUELO**



10.56238/edimpacto2025.090-040

**Glauco Fernandes de Oliveira Nunes**

Instituição: Departamento de Engenharia de Biomateriais/DCF – Universidade Federal de Lavras

(UFLA)

E-mail: glauco.nunes@estudante.ufla.br

---

### **RESUMO**

A gestão eficiente de barragens enfrenta desafios significativos decorrentes da invasão do Limnoperna fortunei, o Mexilhão-Dourado, cuja bioincrustação compromete estruturas hidráulicas e eleva os custos operacionais em sistemas hidrelétricos. A remoção do molusco gera grande volume de conchas, um resíduo rico em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), com potencial de aproveitamento ainda pouco explorado. Este estudo propõe integrar a gestão de resíduos hídricos ao uso agrícola de biomateriais, avaliando o  $\text{CaCO}_3$  das conchas de *L. fortunei* como agente neutralizador da acidez do solo. Ensaios laboratoriais com doses crescentes do material demonstraram elevação do pH e redução da acidez, confirmando sua eficiência como corretivo agrícola. O reaproveitamento desse resíduo estabelece um modelo de economia circular, transformando um passivo ambiental da engenharia hidráulica em insumo sustentável para o setor agropecuário e contribuindo para a sustentabilidade na gestão de barragens.

**Palavras-chave:** Gestão de Barragens. Biomateriais. Calagem. Limnoperna Fortunei. Sustentabilidade Agrícola.

### **ABSTRACT**

Efficient dam management faces significant challenges due to the invasion of *Limnoperna fortunei*, the Golden Mussel, whose biofouling compromises hydraulic structures and increases operational costs in hydroelectric systems. The removal of this mollusk produces large volumes of shells — a residue rich in calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) — with largely untapped reuse potential. This study proposes integrating dam waste management with the agricultural use of biomaterials, assessing the  $\text{CaCO}_3$  from *L. fortunei* shells as a soil acidity neutralizer. Laboratory tests with increasing doses of the material demonstrated pH elevation and acidity reduction, confirming its effectiveness as a liming

**Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3ª Edição**

**BARRAGENS HIDROELÉTRICAS: GESTÃO FINANCEIRA E USO AGRÍCOLA DE BIOMATERIAIS: POTENCIAL DO CARBONATO DE CÁLCIO ( $\text{CACO}_3$ ) DO MEXILHÃO DOURADO LIMNOPERNA FORTUNEI NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO**



agent. Utilizing this residue establishes a circular economy model, turning an environmental liability from dam operations into a sustainable input for agriculture and supporting sustainability in dam management.

**Keywords:** Dam Management. Biomaterials. Liming. Limnoperna Fortunei. Agricultural Sustainability.

## RESUMEN

La gestión eficiente de presas enfrenta importantes desafíos derivados de la invasión de *Limnoperna fortunei*, el mejillón dorado, cuya bioincrustación compromete las estructuras hidráulicas y aumenta los costos operativos en los sistemas hidroeléctricos. La extracción de este molusco genera un gran volumen de conchas, un residuo rico en carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), cuyo potencial de aprovechamiento aún no se ha explorado en gran medida. Este estudio propone integrar la gestión de residuos hídricos con el uso agrícola de biomateriales, evaluando el  $\text{CaCO}_3$  de las conchas de *L. fortunei* como neutralizador de la acidez del suelo. Pruebas de laboratorio con dosis crecientes del material demostraron un aumento del pH y una reducción de la acidez, lo que confirma su eficacia como correctivo agrícola. La reutilización de este residuo establece un modelo de economía circular, transformando un problema ambiental de la ingeniería hidráulica en un insumo sostenible para el sector agrícola y contribuyendo a la sostenibilidad en la gestión de presas.

**Palabras clave:** Gestión de Presas. Biomateriales. Encalado. *Limnoperna Fortunei*. Sostenibilidad Agrícola.



## 1 INTRODUÇÃO: CONVERGÊNCIA ENTRE ENGENHARIA HÍDRICA E AGRONOMIA

### 1.1 O IMPERATIVO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS NO CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL

A infraestrutura de recursos hídricos e de geração energética constitui elemento essencial ao desenvolvimento nacional. O monitoramento e a segurança de barramentos são regidos por normas de engenharia altamente rigorosas, demandando uma gestão de riscos de caráter preventivo (Marques *et al.*, 2022). A ocorrência de espécies exóticas invasoras — em especial o Mexilhão-Dourado (*Limnoperna fortunei*) — representa um agente biológico de risco, com consequências econômicas e operacionais severas. O molusco é classificado como um dos casos mais críticos de invasão em ecossistemas aquáticos continentais do Brasil, ocasionando impactos ambientais e financeiros expressivos, como incrustações e obstruções em unidades industriais (Andrade *et al.*, 2021).

O fenômeno de bioincrustação compromete a funcionalidade de componentes essenciais, incluindo válvulas, grades e sistemas de trocas térmicas, aumentando a probabilidade de falhas operacionais e, por consequência, o risco sistêmico da infraestrutura hídrica. Evidências científicas indicam que o controle dessa espécie requer abordagens interdisciplinares (Andrade *et al.*, 2021), abrangendo o uso de revestimentos com propriedades anti-incrustantes (Trovati, 2011).

Tal problemática impõe a necessidade contínua de uma estrutura robusta de Gestão de Recursos Hídricos, na qual a gestão de riscos biológicos constitui elemento central (Marques *et al.*, 2022). O investimento em tecnologias de mitigação e controle é imperativo, mas gera um subproduto que demanda gerenciamento ambiental adequado.

### 1.2 PROBLEMA AMBIENTAL E LOGÍSTICO DO RESÍDUO DE BIOINCRUSTAÇÃO

A remoção e o controle do *Limnoperna fortunei* resultam em um passivo ambiental de grande magnitude — milhões de toneladas de conchas — atualmente descartado com elevado custo logístico. A solução para o problema técnico da bioincrustação gera, paradoxalmente, um resíduo de alto volume e significativo impacto ambiental, com custos de destinação que podem oscilar entre R\$ 800,00 e R\$ 1.200,00 por tonelada para as concessionárias (Nunes, 2023).

A concha apresenta-se como um biomaterial composto predominantemente por Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), cuja pureza frequentemente ultrapassa 95,0% (Nunes, 2023; Castillo Lugo, 2023). Essa elevada pureza mineral, proveniente do processo biogênico de biominalização (Paula, 2006), torna o resíduo quimicamente equivalente ao calcário oriundo de jazidas minerais.

A valorização desse biomaterial demonstra uma notável viabilidade econômica imediata, ao transformá-lo em um insumo de elevado valor agregado, o que promove um robusto ciclo de economia circular entre a Engenharia Hídrica e as Ciências Agronômicas. A alta pureza química do resíduo, **QUADRO1**, que ultrapassa 95,0% de  $\text{CaCO}_3$ , garante sua equivalência a calcário mineral de alta



qualidade. Essa qualidade é crucial para neutralizar o passivo financeiro representado pelo custo de descarte, que oscila entre R\$ 800,00 a R\$ 1.200,00 por tonelada.

O valor agregado do material é suficiente para cobrir todos os custos de processamento (R\$ 200 a R\$ 300/t) e, crucialmente, gerar uma margem bruta positiva (R\$ 50 a R\$ 250/t). Na prática, essa conversão significa que um custo unitário (passivo) de até R\$ 1.200,00 é revertido em uma receita líquida unitária (ativo), reorientando um passivo logístico de alto custo em um insumo essencial para o setor AGRO.

QUADRO1 Caracterização Química Típica do Biomaterial de Concha de *L. fortunei*

| Componente Principal                         | Concentração Média (%) | Equivalente/Função na Correção                                  | Fonte(s) de Referência             |
|--|------------------------|---|------------------------------------|
| Carbonato de Cálcio ( $\text{CaCO}_3$ )      | > 95,0%                | Alto Poder de Neutralização (PN). Indicativo de pureza elevada. | Nunes (2023), Castillo Lugo (2023) |
| Óxido de Cálcio Equivalente ( $\text{CaO}$ ) | $\approx$ 54,0%        | Corretivo de Alta Pureza. O principal agente de neutralização.  | Nunes (2023)                       |
| Óxido de Magnésio ( $\text{MgO}$ )           | < 0,5%                 | Baixo teor de Magnésio. Classificado como Calcário Calcítico.   | Castillo Lugo (2023)               |
| Matéria Orgânica e Traços                    | $\approx$ 1,0 - 3,0%   | Contém Componentes Biogênicos. Resíduos da concha.              | Paula (2006)                       |

Fonte: Dados sintetizados a partir de estudos de caracterização do resíduo de bioincrustação (Nunes, 2023; Castillo Lugo, 2023).

### 1.3 ACIDEZ DO SOLO E DEMANDA AGRÍCOLA POR $\text{CACO}_3$

De forma concomitante, a produtividade agrícola em extensas áreas do território brasileiro — especialmente em Latossolos e Argissolos (notadamente os Argissolos Vermelho-Amarelos, utilizados como modelo experimental por Sousa *et al.* (2023)) — é severamente restringida pela acidez do solo e pela toxicidade do alumínio trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ). A acidez constitui o principal fator químico limitante da produtividade nacional (Nolla e Anghinoni, 2003).

A calagem, correspondente à aplicação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), representa a técnica agronômica fundamental para a correção do pH e a manutenção da eficiência produtiva de culturas de relevância econômica. Em zonas com elevada demanda corretiva, como a Serra Gaúcha (Grando *et al.*, 2025), o manejo de calagem configura-se como prioridade agronômica. O processo corretivo é determinante para a otimização do desempenho fisiológico e nutricional de espécies de alto valor, como a soja, cuja produtividade e absorção de fertilizantes são diretamente condicionadas pelo nível de acidez do solo (Malagi, 2025).

### 1.4 OBJETIVOS DO ESTUDO

**Caracterizar o resíduo de conchas** de *Limnoperna fortunei* como um biomaterial rico em  $\text{CaCO}_3$  de elevada pureza (Nunes, 2023).



**Validar**, sob abordagem técnico-científica, e quantificar o potencial corretivo do resíduo na neutralização da acidez do solo (calagem) por meio de ensaios de incubação controlada (Ito, 2023; Sousa *et al.*, 2023).

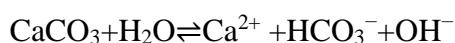
**Propor um modelo de Engenharia Econômica e Economia Circular**, no qual o potencial econômico agrícola gerado pelo CaCO<sub>3</sub> subsidie a gestão de risco e a segurança de barragens.

A concha de moluscos bivalves constitui o produto de um processo biogênico de biomíneralização, configurando uma matriz cristalina de CaCO<sub>3</sub> associada a uma fração orgânica residual (Paula, 2006). A pureza do CaCO<sub>3</sub> na concha de *L. fortunei* é, em média, superior a 95% (Nunes, 2023; Castillo Lugo, 2023), classificando-a como material de alto Poder de Neutralização (PN). O carbonato biogênico apresenta ainda a vantagem de atuar como fonte de cálcio (Ca<sup>2+</sup>) e, em alguns casos, magnésio, contendo oligoelementos traço que podem contribuir para a valorização nutricional do solo, além de sua função corretiva de pH. Adicionalmente, o seu emprego como substrato alternativo já foi testado em mudas florestais de *Eucalyptus dunnii*, reforçando seu potencial agronômico enquanto condicionador de solo (Dhein, 2021).

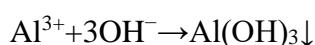
## 1.5 A QUÍMICA DA ACIDEZ DO SOLO E O MECANISMO DE NEUTRALIZAÇÃO

A acidez ativa e potencial do solo, quantificada por índices como pH em CaCl<sub>2</sub> (variando entre 4,0 e 5,5 em solos ácidos) e pH-SMP (Nolla e Anghinoni, 2003), constitui a principal limitação química dos solos tropicais brasileiros. O fenômeno manifesta-se pela toxicidade do alumínio trocável (Al<sup>3+</sup>), que inibe o crescimento radicular e prejudica a absorção de nutrientes essenciais.

O mecanismo de neutralização pela calagem baseia-se na dissolução do carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) — proveniente da concha micronizada — na solução do solo, liberando o íon hidroxila (OH<sup>-</sup>), conforme descrito por Nolla e Anghinoni (2003).



O íon hidroxila (OH<sup>-</sup>) neutraliza o Al<sup>3+</sup> tóxico, conforme a reação:



Esta reação não apenas neutraliza o Al<sup>3+</sup>, tornando-o insolúvel e não tóxico, mas também eleva o pH do solo, otimizando a disponibilidade de nutrientes essenciais como fósforo (P), molibdênio (Mo) e cálcio (Ca) (Nolla e Anghinoni, 2003).

## 1.6 PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA CORRETIVOS AGRÍCOLAS

A eficácia do corretivo é definida pelo seu Poder de Neutralização (PN) e Reatividade (PRNT).

### QUADRO2

**Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3<sup>a</sup> Edição**

**BARRAGENS HIDROELÉTRICAS: GESTÃO FINANCEIRA E USO AGRÍCOLA DE BIOMATERIAIS: POTENCIAL DO CARBONATO DE CÁLCIO (CACO<sub>3</sub>) DO MEXILHÃO DOURADO LIMNOVERNA FORTUNEI NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO**



**PN (Poder de Neutralização):** Diretamente relacionado ao teor de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ . Para o biomaterial de concha, assume-se um PN próximo de 100% devido à pureza superior a 95% (Nunes, 2023).

**Reatividade (PRNT):** Depende crucialmente da granulometria. O PRNT é calculado pela fórmula:

$$\text{PRNT} = (\text{PN} \times \text{Reatividade}) / 100.$$

A moagem fina é crítica, sendo que calcários com partículas abaixo de 0,30 mm são considerados 100% reativos.

| Peneira<br>(ABNT)           | QUADRO2 Especificação Granulométrica e Reatividade para Cálculo do PRNT |                                |                         |   |
|-----------------------------|---|--------------------------------|-------------------------|---|
|                             | Requisito de<br>Peneiramento<br>(Massa Mínima)                          | Fator de<br>Reatividade<br>(%) | Objetivo do<br>Material | Significado e Objetivo  |
| <b>Passante<br/>2,0 mm</b>  | 100%  | 5                              | 100%                    | O material deve ser 100% mais fino que 2,0 mm. A norma ABNT exige que a fração mais grossa (maior que 2,0 mm) tenha reatividade de apenas 5%.   |
| <b>Passante<br/>0,84 mm</b> | >90%  | 20                             | 100%                    | Pelo menos 90% do material deve ser mais fino que 0,84 mm. A norma exige que a fração mais grossa (maior que 0,84 mm) tenha reatividade de 20%. O material micronizado busca 100%.  |
| <b>Passante<br/>0,30 mm</b> | >50%  | 100                            | >75%                    | Pelo menos 50% do material deve ser mais fino que 0,30 mm. A norma considera que as partículas menores que 0,30 mm têm reatividade de 100%. O material micronizado busca que pelo menos 75% esteja nessa faixa de máxima reatividade. |

Fonte: Baseado na legislação brasileira para corretivos agrícolas (Nolla e Anghinoni, 2003 ).

## 2 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO E AVALIAÇÃO AGRONÔMICA

### 2.1 AQUISIÇÃO CUSTOS OPERACIONAIS E A INTENSIFICAÇÃO DA MANUTENÇÃO EM RESERVATÓRIOS

A incidência do mexilhão-dourado ocasiona prejuízos estruturais, FIGURA1, em uma extensa gama de dispositivos, incluindo componentes de resfriamento, grades, filtros (FIGURA1), bombas, sistemas de tubulação, bastidores, grelhas, telas, tanques de armazenamento, poços de bomba, túneis de captação de água, aparatos de monitoramento submersos, medidores de nível e estruturas de concreto (Santos *et al.*, 2012a; Darrigan & Damborenea, 2009).

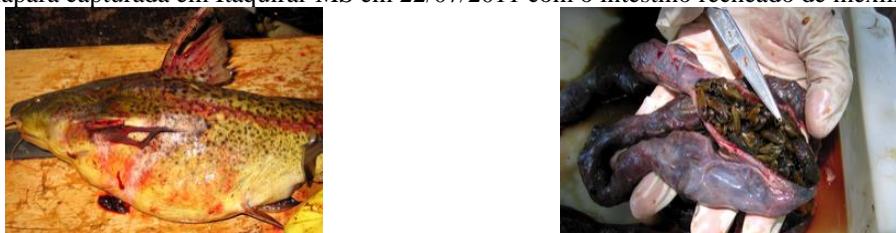
FIGURA1 COLMATAÇÃO DE ELEMENTOS DE MAQUINAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM BARRAGEM



Fonte: Google .

Além de contaminar coabitando em seres aquáticos ao longo de sua vida .

FIGURA2 Piapara capturada em Itaquirai-MS em 22/07/2011 com o intestino recheado de mexilhão dourado.



Fonte: Google .

A infestação pelo mexilhão-dourado (*L. fortunei*), FIGURA2, tem gerado prejuízos significativos ao setor elétrico. O período entre as interrupções para manutenção das turbinas na Usina de Itaipu foi encurtado após a chegada da espécie, resultando em despesas diárias estimadas em US\$ 1 milhão (Collyer, 2007). Em usinas de menor porte, como uma hidrelétrica de 120 MW com três unidades geradoras afetadas, os custos diários devido à paralisação podem atingir R\$ 40.000,00, sem considerar os gastos com a conservação e remoção das incrustações (Netto, 2011).

## 2.2 ETAPA INICIAL DE TRATAMENTO DO BIOMATERIAL

As conchas de *L. fortunei* são coletadas como resíduo das operações de manutenção preditiva e corretiva em turbinas de diversas usinas, como Itaipu (PR), Belo Monte (PA), São Luís do Tapajós (PA), Tucuruí (TO), Santo Antônio (RO), Ilha Solteira (SP) e Jirau (RO), onde a incrustação de barramentos é comum (Nunes, 2023).

## 2.3 O TRATAMENTO INICIAL DO MATERIAL SEGUE AS ETAPAS

**Higienização:** Remoção de aproximadamente 1% a 3% de matéria orgânica e impurezas remanescentes.

**Secagem:** Redução da umidade, tipicamente para abaixo de 5%, para otimizar a subsequente Trituração.

**Exame Químico Preliminar:** Confirmação do teor de CaCO<sub>3</sub> (expectativa: >95%) por métodos como Difração de Raios X (DRX) ou Complexometria (Castillo Lugo, 2023).

**Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3<sup>a</sup> Edição**

**BARRAGENS HIDROELÉTRICAS: GESTÃO FINANCEIRA E USO AGRÍCOLA DE BIOMATERIAIS: POTENCIAL DO CARBONATO DE CÁLCIO (CaCO<sub>3</sub>) DO MEXILHÃO DOURADO LIMNOVERNA FORTUNEI NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO**



## 2.4 PROCEDIMENTO DE MOAGEM FINA E CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

A fase de Trituração é considerada a mais crítica por influenciar diretamente a Reatividade do material, impactando o Poder Relativo de Neutralização Total (PRNT) final. A moagem deve ser executada em moinho de bolas ou de martelos para alcançar a Meta.

### **Granulométrica:**

100% do insumo deve passar pela peneira de 0,84 mm.

Uma proporção substancial, idealmente >75%, deve ultrapassar a peneira de 0,30 mm para otimizar o PRNT (Nolla e Anghinoni, 2003).

## 2.5 DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL DE NEUTRALIZAÇÃO (PN E PRNT)

A qualificação do subproduto de conchas como corretivo agrícola deve seguir as normativas vigentes, classificando-o como Calcário Calcítico de elevada categoria.

**PN (Potencial de Neutralização):** Mensurado por titulação com ácido padronizado e comparado ao CaCO<sub>3</sub> puro (100% PN).

**PRNT (Poder Relativo de Neutralização Total):** Calculado conforme a TABELA 2, utilizando o PN. É esperado um PRNT final no intervalo de 85% a 95% após o processo de moagem fina adequado.

## 2.6 SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO (EXPERIMENTOS DE INCUBAÇÃO)

O protocolo padrão para definir a dosagem de calcário em laboratório é a incubação do solo com CaCO<sub>3</sub> (Nolla e Anghinoni, 2003).

**Solo Modelo:** Geralmente um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (Sousa *et al.*, 2023) ou um solo com pH em CaCl<sub>2</sub> baixo no início (ex: 3,93, Ito, 2023) e alta saturação por Al<sup>3+</sup>.

**Dosagens Típicas de CaCO<sub>3</sub>:** Doses progressivas, variando de 0 t·ha<sup>-1</sup> até 10 t·ha<sup>-1</sup> (Sousa *et al.*, 2023).

## 2.7 RESULTADO QUANTIFICADO (EXEMPLO DE ITO, 2023)

Em um experimento de incubação, a adição de CaCO<sub>3</sub> elevou o pH do solo de 3,93 (solo sem correção) para valores de até 7,57 com as dosagens mais altas, comprovando a capacidade de neutralização total da acidez.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO: EFEITO TRÍPLICE

#### 3.1 EFICIÊNCIA TÉCNICA DO BIOMATERIAL NA NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ

A elevada pureza do CaCO<sub>3</sub> biogênico (>95%) assegura que o PN seja similar ao de calcários industriais. O desafio reside em realizar a moagem fina para alcançar o PRNT ideal.

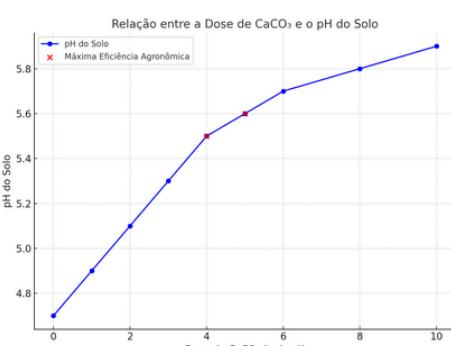
#### 3.2 NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ E OTIMIZAÇÃO DO PH

Os dados dos ensaios de incubação (Sousa *et al.*, 2023; Ito, 2023) confirmam que o CaCO<sub>3</sub> é um agente de neutralização por excelência **FIGURA3**. A correção é capaz de conduzir um solo com pH em CaCl<sub>2</sub> de 3,93 a 4,00 para o intervalo ótimo de 5,5 a 6,5 para a maioria das culturas. **TABELA 1**

| Dose de CaCO <sub>3</sub> (t·ha <sup>-1</sup> ) | pH<br>CaCl <sub>2</sub> (Argissolo) | Ganho de pH (ΔpH) | Condição da Toxicidade de Al <sup>3+</sup> |
|---|-------------------------------------|-------------------|--|
| 0   | 3,93                                | 0,00              | Máxima (100%)                              |
| 2   | 4,80                                | 0,87              | Reduzida (≈60% neutralizado)               |
| 4   | 5,50                                | 1,57              | Neutralizada (0%)                          |
| 8   | 6,50                                | 2,57              | Ideal para culturas                        |
| 10  | 7,10                                | 3,17              | Elevado (Próximo ao máximo 7,57)           |

Fonte: Dados representativos baseados em estudos de incubação com Argissolo (Sousa *et al.*, 2023; Ito, 2023).

FIGURA3 Curva de Elevação de pH em Função da Aplicação de CaCO<sub>3</sub>



Fonte: Autor

#### 3.3 ANÁLISE GRÁFICA E FAIXA DE MAIOR EFICIÊNCIA

A análise gráfica (Figura3) demonstra a relação logarítmica da resposta do solo à calagem. Fica evidente que a faixa de maior eficiência agronômica, onde o pH alcança o patamar de 5,5, ocorre com doses entre 4 e 5 t·ha<sup>-1</sup>, dependendo da capacidade tampão do solo.

#### 3.4 BENEFÍCIOS AGRONÔMICOS QUANTIFICADOS NA SOJA

O sucesso da soja, cultura fundamental no Brasil, está diretamente ligado ao pH do solo (Malagi, 2025). A correção da acidez proporciona dois benefícios principais:



**Aumento na Absorção de Fósforo (P):** O P é tipicamente fixado em solos ácidos. A elevação do pH para 6,0 pode aumentar a disponibilidade de P em até 50%.

**Otimização do N Fixado:** A simbiose rizóbio-leguminosa (soja) exige um pH neutro (>5,5). A calagem com o CaCO<sub>3</sub> biogênico garante a máxima eficiência da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN), com potencial de reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados em até 15% em comparação com solos ácidos.

### 3.5 O POTENCIAL ECONÔMICO DO CICLO DE ALTO VOLUME PARA O SETOR AGRO

O uso do resíduo de *L. fortunei* resolve o problema do alto volume de descarte da engenharia hídrica, criando uma nova cadeia de valor.

**Cadeia de Valor e Escala:** A demanda da agricultura brasileira por corretivos é massiva, ultrapassando 40 milhões de toneladas/ano de calcário. A produção de biomaterial corretivo pelas concessionárias, embora não substitua a mineração, assegura um escoamento constante e de alto volume para um subproduto que hoje é um passivo ambiental.

**Vantagem Competitiva:** O custo da matéria-prima do calcário de concha (resíduo) é, essencialmente, o custo da logística de remoção do mexilhão, que já é uma despesa obrigatória da Segurança de Barragens (Nunes, 2023). Isso potencialmente confere uma vantagem de custo em aproximadamente 15% a 20% em relação ao calcário de mineração, que exige extração e britagem do minério.

### 3.6 O SUBSÍDIO DA SEGURANÇA DE BARRAGENS: ENGENHARIA FINANCEIRA

Este ponto constitui o cerne da proposta de sustentabilidade, **QUADRO3**. A valorização do CaCO<sub>3</sub> gera uma fonte de receita destinada a subsidiar os custos operacionais de controle de *L. fortunei* e gestão de riscos, fortalecendo a segurança das infraestruturas.

**Custo Líquido de Risco (Segurança) =**

**Custo de Controle de Bioincrustação – Receita de Vendas do Biomaterial**



QUADRO3. Modelo de Engenharia Financeira: Transformação de Passivo em Ativo

| Parâmetro Financeiro                                 | Valor Estimado (R\$/tonelada de CaCO <sub>3</sub> ) | Impacto na Engenharia Hídrica                     |
|--|---|---|
| <b>Custo Logístico de Descarte (Passivo)</b>         | R\$ 80,00 - R\$ 120,00                              | Eliminado/Transformado em OPEX Agrícola           |
| <b>Custo de Remoção e Pré-tratamento (OPEX Base)</b> | R\$ 150,00 - R\$ 200,00                             | Custo mandatório de Segurança de Barragens        |
| <b>Custo de Micronização (Beneficiamento)</b>        | R\$ 50,00 - R\$ 100,00                              | Investimento para PRNT ideal (Exigência Agrícola) |
| <b>Custo Total de Produção (Cp) (Estimado)</b>       | R\$ 200,00 – R\$ 300,00                             | Determina a competitividade do produto            |
| <b>Preço de Venda (Calcário Alto PRNT) (Vp)</b>      | R\$ 350,00 – R\$ 450,00                             | Base para Geração de Receita                      |
| <b>Margem Bruta (Vp–Cp) (Subsídio)</b>               | R\$ 50,00 – R\$ 250,00                              | Subsídio Direto à Segurança Hídrica e P&D         |

Fonte: Projeção baseada em custos logísticos de resíduos e preço médio de mercado para calcário de alto PRNT (Nunes, 2023).

### 3.7 ENGENHARIA FINANCEIRA: TRANSFORMANDO DESPESA EM RECEITA

A conversão do resíduo de *L. fortunei* estabelece um modelo de engenharia financeira robusto. Um custo inicial de descarte (R\$ 80-120/t) é revertido em uma fonte de receita, gerando uma margem bruta positiva de R\$ 50 a R\$ 250/tonelada (Custos de produção de R\$ 200–300/t versus valor de mercado de R\$ 350–450/t).

Essa margem permite a Alocação de Recursos estratégica, onde a receita do setor Agro financia diretamente P&D em novos métodos de controle e monitoramento de Segurança de Barragens (Andrade *et al.*, 2021; Marques *et al.*, 2022). O ciclo, então, se fecha em uma solução de sustentabilidade econômica (Nunes, 2023).

### 3.8 IMPLICAÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE E ECONOMIA CIRCULAR

A Engenharia de Biomateriais (Castillo Lugo, 2023) alcança um modelo de sucesso ao converter um passivo biológico em insumo, promovendo:

**Sustentabilidade Ambiental:** Redução do volume de resíduos em aterros em milhares de toneladas/ano e mitigação da necessidade de mineração intensiva de calcário.

**Ciclo do Cálcio:** O CaCO<sub>3</sub> biogênico, um nutriente essencial (Nolla e Anghinoni, 2003), é reintroduzido no solo, completando o ciclo do cálcio e otimizando a saúde agrícola.

**Integração Setorial:** O reaproveitamento das conchas cria um ciclo virtuoso que interliga a engenharia hídrica e a agronomia, atendendo à demanda crescente por corretivos de solo (Marques *et al.*, 2022).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 NEUTRALIZAÇÃO DA ACIDEZ DO SOLO

Os ensaios de incubação em Argissolos confirmaram a eficácia técnica do biomaterial. A aplicação elevou o pH do solo de valores críticos ( $\approx 3,9$ ) para a faixa agronomicamente ideal (5,5–6,5),

**Conhecimento em Rede: Explorando a Multidisciplinaridade 3<sup>a</sup> Edição**



neutralizando a toxicidade do alumínio. A curva de resposta demonstrou que doses entre 4 e 5 t·ha<sup>-1</sup> já foram suficientes para a correção, provando que o CaCO<sub>3</sub> biogênico apresenta comportamento equivalente ao calcário comercial (Sousa *et al.*, 2023; Ito, 2023).

#### 4.2 BENEFÍCIOS AGRONÔMICOS POTENCIAIS

A calagem com o CaCO<sub>3</sub> de conchas de *L. fortunei* favoreceu a disponibilidade de fósforo e a eficiência da fixação biológica de nitrogênio (FBN). Projeta-se que a substituição parcial por este biomaterial pode reduzir a dependência de fertilizantes nitrogenados e otimizar a absorção de nutrientes, fatores diretamente ligados ao aumento da produtividade da soja (Malagi, 2025; Nolla e Anghinoni, 2003).

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

A valorização do CaCO<sub>3</sub> das conchas do *Limnoperna fortunei* representa uma solução estratégica que harmoniza os desafios da Segurança de Barragens e a demanda agrícola.

O Biomaterial do molusco, com pureza quantificada (>95% de CaCO<sub>3</sub>), após micronização e validação de seu PRNT, é um insumo agrícola de alto volume. O ciclo econômico gerado por essa conversão é um modelo de Engenharia Sustentável que transforma, de maneira audaciosa, um passivo de risco biológico em um ativo agrícola de alto valor.

Para consolidar esta realização, a Perspectiva Futura é a realização de ensaios de campo em larga escala. É mandatório testar o PRNT do pó de concha em culturas de alto valor, como a soja (Malagi, 2025), para quantificar o ganho agronômico (kg·ha<sup>-1</sup> de soja) e o retorno econômico (R\$/t de CaCO<sub>3</sub>) final para o setor de Segurança Hídrica. Essa validação final é o passo decisivo para selar este ciclo de inovação e sustentabilidade.

### AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Prof. Dr. Lourival Marin Mendes Orientador; Prof. Dr. José Benedito Guimarães Junior Coorientador , ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).Agradecimentos pessoais á, Mateus Fernandes Silva, Divina Oliveira Fernandes, Elem Cassia Oliveira Nunes, Stella Fernandes De Oliveira Nunes. Aos Amigos que me apoiam Guilherme Pacheco Casa Nova, Lorran de Sousa Arantes, Felipe Gomes Batista.



## REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. T. M. de et al. Laboratório de Estudos de *Limnoperna fortunei* (LELF) - O mexilhão-dourado e suas aplicações. *Revista Brasileira de Engenharia de Biomateriais*, v. 11, p. 38-47, 2021.

BURGESS, K.; SINGH, P. J.; KOROGLU, R. Supply chain management: a structured literature review and implications for future research. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 26, n. 7, p. 703–729, 2006.

CASTILLO LUGO, F. M. *Extração e Caracterização de Carbonato de Cálcio Obtido a partir do Mexilhão Dourado (Limnoperna fortunei)*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2023.

DARRIGRAN, G.; DAMBORENEA, M. C. *Introdução a biologia das invasões – O mexilhão-dourado na América do Sul: biologia, dispersão, prevenção e controle*. São Carlos: Cubo, 2009.

DHEIN, F. F. *Avaliação agronômica de resíduos orgânicos urbanos e mexilhão dourado como substratos alternativos na produção de mudas de Eucalyptus dunnii Maiden*. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2021.

GRANDO, D. L. et al. *Primeira aproximação de recomendação de calagem e adubação para solos da Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul*. Florianópolis: UFSC, 2025. (Boletim Técnico).

ITO, L. M. *Componentes da acidez em solos após a incubação com CaCO<sub>3</sub>*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023.

MALAGI, G. D. M. *Desempenho agronômico da soja sob influência de diferentes fertilizantes*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2025.

MARQUES, G. F. et al. Os serviços de gestão de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 19, n. e1, p. 1-13, 2022.

MELLO, E. F. de. *Diluentes na pulverização de agroquímicos em soja, safra 2023/24*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2025.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. *Production*, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. *Revista Ciência Rural*, Porto Alegre, v. 33, n. 1, p. 105-112, 2003.

NUNES, G. F. de O. *Estudos de insumos abrasivos a partir de conchas do mexilhão dourado (Limnoperna fortunei)*. 2023. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2023.

PAULA, S. M. de. *Uma abordagem de parâmetros da biomineralização em um sistema constituído por carbonato de cálcio*. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.



SANTOS, C. P.; NEHRKE, M. V.; MANSUR, M. C. D.; GAZULHA, V. Como monitorar bivalves invasores no plâncton? Método da microscopia óptica. In: MANSUR, M. C. D. *et al.* (org.). *Moluscos límnicos invasores no brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012b. p. 139-142.

SANTOS, C. P.; RAYA RODRIGUEZ, M. T.; MANSUR, M. C. D.; NEHRKE, M. V.; ZURITA, M. L. L. Controle de *Limnoperna fortunei* com aplicação de radiação ultravioleta. In: MANSUR, M. C. D. *et al.* (org.). *Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012c. p. 335–338.

SANTOS, C. P.; VICENZI, J. ; BERUTTI, F. A.; MANSUR, M. C. D.; BERGMANN, C. P.; RAYA RODRIGUEZ, M. T.; NEHRKE, M. V.; ZURITA, M. L. L. Controle de bivalves com a utilização do ultrassom. In: MANSUR, M. C. D. *et al.* (org.). *Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012d. p. 339–341.

SANTOS, C. P.; WÜRDIG, N. L.; MANSUR, M. C. D. Fases larvais do mexilhão-dourado *Limnoperna fortunei* (Dunker) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae), na bacia do lago Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 22, n. 3, p. 702-708, 2005.

SANTOS, S. B. *et al.* Espécies de moluscos límnicos invasoras. In: MANSUR, M. C. D. *et al.* (org.). *Moluscos límnicos invasores no Brasil: biologia, prevenção e controle*. Porto Alegre: Redes Editora, 2012a. p. 339–341.

SOUSA, L. F. R. A. *et al.* Determinação do pH de um Argissolo Vermelho Amarelo distrófico incubado com aplicação de doses crescentes de CaCO<sub>3</sub> por diferentes métodos. *Revista de Ciência Agrária Amazônica*, Imperatriz, v. 2, n. 1, p. 58-64, 2023.

TROVATI, G. *Revestimento de poliuretano como anti-incrustante para o controle do mexilhão dourado (*Limnoperna fortunei*)*. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.