

Publicação da Secretaria de Política Agrícola
do Ministério da Agricultura e Pecuária,
editada pela Embrapa

e-ISSN 2317-224X
ISSN 1413-4969
Página da revista: www.embrapa.br/rpa

Artigo

Impacto econômico da solubilização biológica de fosfatos no Brasil¹

Resumo – Este estudo estimou o impacto potencial da adoção em escala nacional da solubilização biológica de fosfatos (SBF) na cultura da soja no Brasil. Sob a hipótese de que a SBF impulsiona a agricultura sustentável ao aliar produtividade e eficiência de custos, compararam-se dados experimentais a parâmetros de políticas públicas de fomento agrícola. Os resultados indicam que a difusão dessa tecnologia tem o potencial de gerar, por safra: i) elevação da produtividade da soja – com aumento de receita anual de R\$ 28,5 bilhões; ii) economia de custos de até 15,7 bilhões pela redução no uso de fertilizantes químicos; e iii) redução de emissões equivalente a até R\$ 1 bilhão em benefícios de descarbonização. Trata-se do primeiro estudo realizado para avaliar tanto os ganhos econômicos com a SBF quanto os ganhos de descarbonização da agricultura.

Palavras-chave: bioinsumos, descarbonização, fertilizantes.

Biological phosphate solubilization in Brazil

Abstract – This study estimated the potential impact of scaling up biological phosphate solubilization (BPS) in soybean cultivation in Brazil. Under the hypothesis that BPS drives sustainable agriculture by combining productivity gains and cost efficiency, experimental data were compared with parameters from agricultural promotion public policies. The results indicate that the diffusion of this technology has the potential to generate, per harvest: i) an increase of up to BRL 28.5 billion in soybean production value; ii) savings of up to BRL 15.7 billion from reduced chemical fertilizer use; and iii) an emissions reduction equivalent to up to BRL 1 billion in carbon mitigation benefits. This is the first study to evaluate both the economic gains from SBF and the decarbonization gains in agriculture.

Keywords: bioinputs, decarbonization, fertilizers.

Bruno Santos Abreu Caligaris 
Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos,
Brasília, DF, Brasil
E-mail: bcaligaris@hotmail.com
 Autor correspondente

José Eustáquio Ribeiro Vieira Filho 
Instituto de Pesquisa Econômica aplicada, Diretoria de
Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais,
Brasília, DF
E-mail: jose.vieira@ipea.gov.br

Christiane Abreu de Oliveira Paiva 
Embrapa Milho e Sorgo,
Sete Lagoas, MG, Brasil
E-mail: christiane.paiva@embrapa.br

Recebido
2/2/2026

Aceito
22/4/2026

Como citar
CALIGARIS, B.S.A.; VIEIRA FILHO, J.E.R.; PAIVA, C.A. de O.
Impacto econômico da solubilização biológica de fosfatos
no Brasil. *Revista de Política Agrícola*, v.35, e02113,
2026. DOI: <https://doi.org/10.35977/2317-224X.rpa2026.v35.02113>.

¹ Este trabalho é derivado da dissertação de mestrado de Bruno Santos Abreu Caligaris (Caligaris, 2024), apresentando atualizações nas estimativas originais e refinamentos na abordagem metodológica.

Introdução

A agricultura brasileira é amplamente reconhecida como um caso de sucesso na economia mundial (Alves, 2010; Fishlow & Vieira Filho, 2020; Pastore, 2021). O processo de desenvolvimento e diversificação produtiva tem gerado renda e emprego em diferentes segmentos da atividade econômica (Srinivas & Vieira Filho, 2015; Vieira Filho, 2024). Em 2023, o Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio alcançou R\$ 2,7 trilhões (Cepea, 2024). Conforme IBGE (2024a), o setor respondeu por 23,9% do valor adicionado da economia.

O agronegócio também exerce um papel fundamental no mercado de trabalho. Em 2023, cerca de 28,3 milhões de pessoas estavam ocupadas no setor, o que correspondeu a 26,7% do total de trabalhadores ocupados no País (IBGE, 2024b). No comércio exterior, o setor consolida-se como um vetor estratégico: as exportações do agronegócio somaram US\$ 166,6 bilhões em 2023, equivalendo a 49% de toda a pauta exportadora brasileira.

Para alcançar esse destaque na produção, no emprego e no comércio internacional, o agronegócio passou a ser intensivo em insumos modernos: máquinas, equipamentos, mão de obra qualificada, variedades de alto rendimento, defensivos agrícolas, além de fertilizantes e outros insumos para a nutrição de plantas. A demanda por insumos cresceu, como foi o caso dos fertilizantes químicos.

Embora conte com vantagens naturais – como clima favorável, ampla disponibilidade de terras, produtores inovadores e uma sólida rede de ciência e tecnologia –, o setor enfrenta desafios estruturais, com destaque para a baixa fertilidade natural dos solos brasileiros. Superar essa limitação, historicamente, exigiu expressivos investimentos em pesquisa, resultando no uso intensivo de fertilizantes minerais à base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) (Bernardi et al., 2002).

Desde a década de 1990, o aumento da produção de grãos no Brasil esteve diretamente associado ao uso de fertilizantes em larga escala. De acordo com Anda (2024), embora o Brasil seja um dos maiores consumidores mundiais (cerca de 8% do total global), o País depende fortemente das importações, sendo mais de 80% do fertilizante utilizado importado, em um mercado altamente concentrado (Brasil, 2023).

Até 2000, a produção nacional de fertilizantes respondia por cerca de metade do consumo in-

terno. Entretanto, com o crescimento da demanda e com o baixo preço relativo do insumo, viabilizou-se o aumento da oferta de fertilizantes por meio da importação, e não pelo crescimento da capacidade nacional de produção. Nos últimos 15 anos, observou-se, inclusive, retração da capacidade produtiva (Brasil, 2023).

Diante dos fatores mencionados, o Brasil buscou desenvolver estratégias para reduzir a dependência de fertilizantes químicos importados ou maximizar a sua eficiência. Afinal, a autonomia – ainda que parcial – na oferta de insumos aumenta a competitividade do agronegócio no mercado global e reduz sua vulnerabilidade às oscilações internacionais. E é exatamente isso que o uso em larga escala de produtos biológicos para a solubilização biológica de fosfato (SBF) pode oferecer.

A SBF é um processo baseado na ação de microrganismos capazes de liberar fósforo solúvel do solo ou da matéria orgânica. O avanço tecnológico nesse campo tem permitido maior eficiência na absorção de fosfato, tanto da fertilização química quanto dos estoques naturais do solo. Estudos apontam que a adoção da SBF pode reduzir em até 50% o uso de fertilizantes fosfatados (Patil et al., 2012; Lavakush et al., 2014; Granada et al., 2018; Wang et al., 2022) e elevar a produtividade da soja em 10,5%, em média (Oliveira-Paiva et al., 2021b). Assim, o objetivo deste artigo é mensurar o impacto potencial dessa tecnologia.

Oferta internacional de fertilizantes

O setor produtor de fertilizantes apresenta elevada concentração regional, uma vez que a disponibilidade de recursos naturais é geograficamente desigual. Os principais países produtores de matérias-primas são China (NPK), Rússia (NPK), EUA (NP), Índia (N), Marrocos (P), Canadá (K) e Bielorrússia (K). Entre eles, os EUA e a Índia destinam praticamente toda a produção ao consumo interno. A China, embora o maior produtor, absorve parcela significativa de sua produção, mas também atua como grande exportadora. Já os demais produtores concentram-se basicamente na exportação (Brasil, 2023).

Além da concentração regional, o setor é dominado por poucas empresas: Mosaic e CF Industries (EUA), Yara (Noruega), Nutrien (Canadá), Office Chérifien des Phosphates (OCP) (Marrocos), Belaruskali (Bielorrússia), Sinofert (China), Uralkali e Phosagro (Rússia), Eurochem (Suíça-Rússia), Saudi

Basic Industries Corporation (Sabic) (Arábia Saudita), K+S (Alemanha) e Israel Chemicals Ltd (ICL) (Israel) (GlobalFert, 2022).

Essa dupla concentração, regional e empresarial, expõe o Brasil a crises externas capazes de afetar tanto os preços quanto a disponibilidade doméstica de fertilizantes. A oferta de matérias-primas a custos competitivos é fator crucial para a produção desses insumos. No caso dos fertilizantes fosfatados, sua fabricação decorre da reação da rocha fosfática com insumos como ácido sulfúrico, ácido fosfórico ou amônia, resultando em produtos como superfosfato simples (SSP), superfosfato triplo (TSP), fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP). Utilizados em larga escala em diversos cultivos agrícolas, esses fertilizantes elevam a produtividade ao fornecerem maiores concentrações de fósforo (Globalfert, 2024).

A Figura 1 mostra que o Brasil importou nove milhões de toneladas de fertilizantes fosfatados em 2023, além da participação por tipo de produto.

Conforme a Figura 2, a maior parte das importações brasileiras de fertilizantes fosfatados em 2023 correspondeu ao MAP, e, de forma agregada, Rússia (26%) e Marrocos (23%) concentraram praticamente metade das importações brasileiras de fosfatados (Globalfert, 2024).

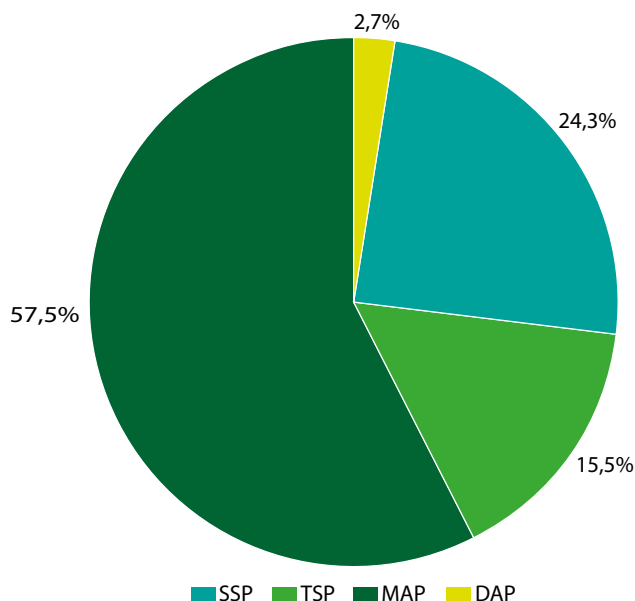


Figura 1. Percentual dos tipos de fertilizantes fosfatados importados pelo Brasil em 2023.

Cabe ressaltar que várias das regiões exportadoras enfrentaram episódios de instabilidade política e econômica, o que aumenta a vulnerabilidade do Brasil à volatilidade da oferta e dos preços internacionais, tal como observado por Ogino et al. (2023).

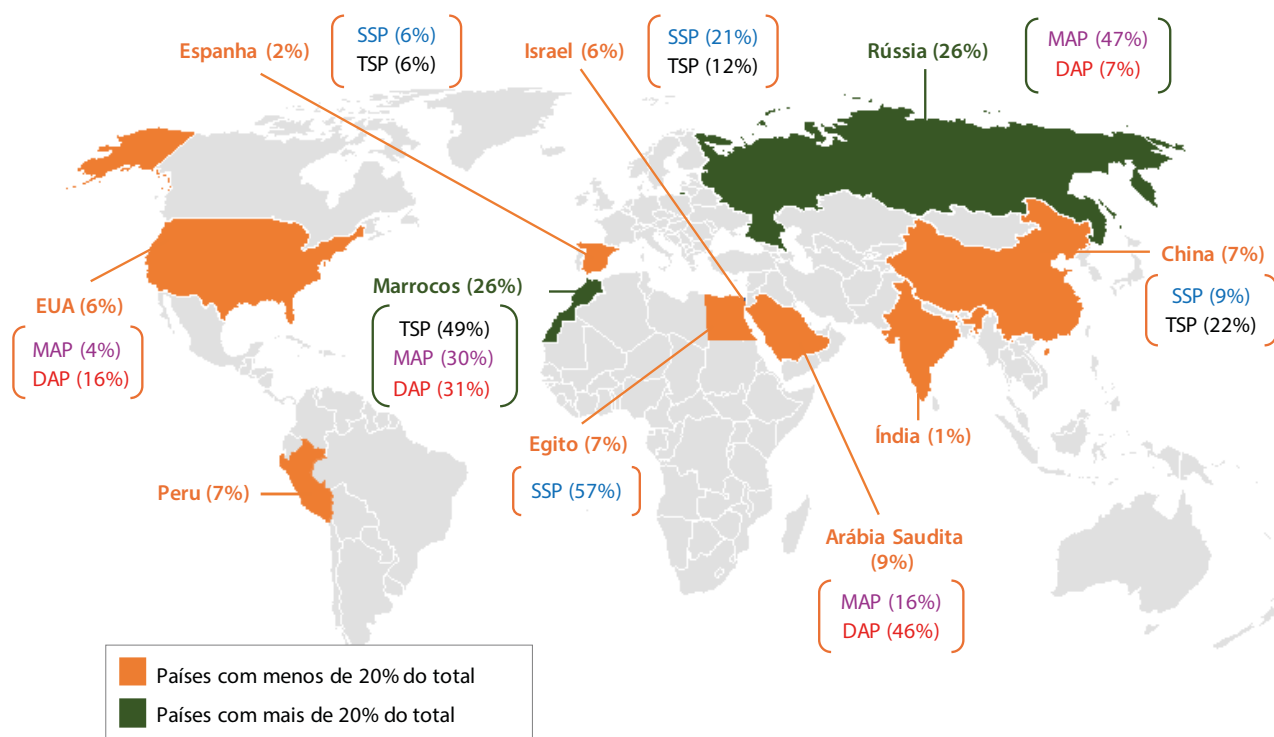


Figura 2. Principais países fornecedores de fertilizantes fosfatados para o Brasil em 2023.

Metodologia

Solubilização biológica de fosfato

Pesquisas têm buscado aprimorar a absorção dos fosfatos do solo pelas plantas. No Brasil, as condições edafoclimáticas reduzem sua disponibilidade (Mendes & Reis Junior, 2003). Nos solos tropicais, especialmente no Cerrado, o intemperismo favorece a presença de argilas e óxidos que fixam o fosfato, diminuindo a fração efetivamente acessível às plantas.

Essa competição entre plantas e solo é conhecida como “custo solo”, que resulta em baixo aproveitamento do nutriente e demanda maior aplicação de fertilizantes, elevando os custos de produção. Estima-se que cerca de 70% do fosfato aplicado por meio de fertilizantes minerais ou orgânicos permaneça retido no solo em formas pouco disponíveis às plantas (Pavinato et al., 2020).

Com esse desafio em vista, pesquisas são conduzidas no Brasil há cerca de 20 anos, com resultados promissores associados à SBF. Segundo Oliveira et al. (2009), nesse bioprocessos, microrganismos, como fungos e bactérias, transformam fosfatos insolúveis, fixados no solo, em formas solúveis, aumentando a disponibilidade desse nutriente para as plantas.

Os microrganismos solubilizadores de fosfato (MSPs) atuam por meio de dois mecanismos principais: solubilização e mineralização. Entre os gêneros mais relevantes, destacam-se *Pseudomonas*

e *Bacillus* (bactérias), além de *Aspergillus* (fungos). Na solubilização, a produção de ácidos orgânicos e inorgânicos promove a liberação do fosfato associado a óxido de ferro, alumínio e cálcio, tornando-o solúvel e acessível às raízes. Além disso, a secreção de compostos quelantes, como sideróforos, facilita a ligação de cátions (ferro e cálcio), auxiliando no processo. Na mineralização, por sua vez, os MSPs liberam enzimas, como a fosfatase, que degrada compostos orgânicos que contêm fósforo, liberando-o no solo (Bini & Varón Lopez, 2016).

De uma forma ou de outra, esses bioprocessos reduzem o pH do solo, promovendo a solubilização do fosfato (Figura 3). É importante salientar que os MSPs não produzem fosfato, mas aumentam a sua disponibilidade ao dissociá-lo dos minerais ou da matéria orgânica, facilitando a absorção pelas plantas.

Além da liberação de enzimas e ácidos orgânicos responsáveis pela mineralização e solubilização do fosfato, a ação dos MSPs promove o aumento de raízes finas e a formação de biofilmes. Esses mecanismos permitem maior absorção de fósforo nos estágios iniciais de crescimento, conferindo às plantas maior vigor e melhor arranque, o que resulta em ganhos de produtividade (Marin et al., 2015).

Para compreender a base tecnológica da SBF, o estudo considerou inicialmente a experiência acumulada com a fixação biológica de nitrogênio (FBN), já consolidada no Brasil – Döbereiner (1978), Döbereiner & Duque (1980); Hungria et al. (2013);

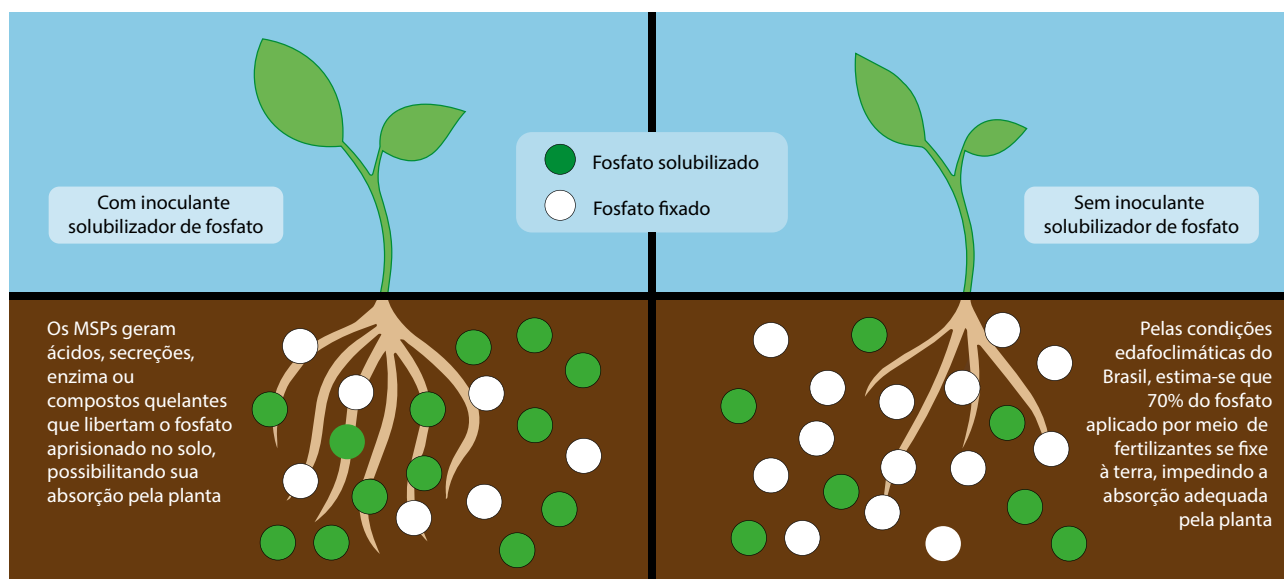


Figura 3. A solubilização biológica de fosfato.

Santos et al. (2019, 2021); e Telles et al. (2023). Em seguida, para aprofundar a análise da SBF, esta pesquisa usou como principais referências os trabalhos de Corrêa et al. (2004), Oliveira et al. (2009), Patil et al. (2012), Lavakush et al. (2014), Marin et al. (2015), Bini & Varón Lopez (2016), Granada et al. (2018), Pavinato et al. (2020) e Wang et al. (2022).

Complementarmente, foram consultados boletins técnicos e circulares da Embrapa que reúnem avanços em FBN e SBF. Entre essas publicações, destacam-se os trabalhos de Marin et al. (1999), Hungria et al. (2001, 2007), Mendes & Reis Junior (2003), Souza et al. (2016), Paiva et al. (2020), Oliveira (2020), Oliveira-Paiva (2021a, 2021b), Vasconcelos et al. (2021) e Cançado et al. (2021). Esse referencial subsidiou diretamente as análises quantitativa e qualitativa da pesquisa.

Método de análise

Cálculo da economia de fertilizantes

Para mensurar os ganhos decorrentes do incremento produtivo, foram utilizados dados de seis ensaios de campo conduzidos com a cultura da soja, os quais avaliaram o uso de inoculantes solubilizadores de fósforo (SBF) no desenvolvimento das plantas. Esses experimentos analisaram a eficiência agrônômica de diferentes microrganismos solubilizadores, considerando a interação de três parâmetros: i) formulações biológicas de SBF; ii) vias de aplicação; e iii) dosagens testadas.

No que se refere aos insumos, cada estudo avaliou um conjunto específico de solubilizadores. Em comum, todos utilizaram ao menos dois produtos: o BiomaPhos – inoculante lançado pela Embrapa em 2019 e formulado com as bactérias *Bacillus subtilis* e *Bacillus megaterium* – e o Meli-X Turbo, desenvolvido pela Vittia e lançado em 2022, cuja formulação é à base de *Bacillus velezensis*.

Os métodos de aplicação compreenderam o tratamento de sementes, a aplicação no sulco de plantio, a modalidade plante-aplique (realizada logo após a semeadura) e a aplicação foliar em V3/V4 (estádios vegetativos do desenvolvimento da cultura). As dosagens variaram de 0,1 a 5 litros ou quilogramas por hectare, a depender das recomendações de cada produto.

Apoiada nesses estudos de caso, em dados secundários e na literatura científica, a mensuração do impacto econômico-ambiental contempla:

i) a redução no uso de fertilizantes químicos fosfatados, com consequente diminuição do custo de produção; ii) o aproveitamento do estoque de fósforo acumulado no solo; iii) o incremento na produtividade da soja, gerando ganhos de receita; e iv) a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (CO₂eq), decorrente da substituição parcial da adubação mineral por bioinsumos.

Quanto à economia de insumos, pesquisas conduzidas desde a década de 2000 apontam uma expressiva redução na demanda por adubação fosfatada a partir do uso da SBF. Para a cultura do milho, Patil et al. (2012) concluíram ser possível reduzir em até 50% o uso de fertilizantes minerais mediante a inoculação de sementes com os fungos solubilizadores *Penicillium bilaii* e *Penicillium* spp. Em consonância, Wang et al. (2022) observaram incremento de 22% no fósforo disponível e decréscimo superior a 46% nas frações de fósforo estabilizadas no solo após a aplicação de SBF.

No cultivo do arroz, Lavakush et al. (2014) também estimaram redução de 50% no aporte de fertilizantes. Além disso, ao revisarem múltiplos ensaios, Granada et al. (2018) apontaram decréscimo médio de 33% na necessidade de adubação fosfatada em diferentes culturas submetidas à inoculação de sementes com microrganismos solubilizadores.

Portanto, considerando a elevação da disponibilidade de fosfato no solo e a possibilidade de redução da adubação em patamares entre 30% e 50%, a SBF representa uma alternativa de elevada economia quando aplicada em larga escala, ainda que sujeita a variações segundo a cultura e a disponibilidade inicial de fosfato no solo.

O cálculo da economia decorrente do menor uso de fertilizantes químicos requer a distinção entre a adubação corretiva e a de manutenção. A corretiva, denominada fosfatagem, visa elevar o teor de fósforo em solos deficientes a níveis adequados ao cultivo. Sua dose é calculada pela diferença entre a disponibilidade atual e a desejada, multiplicada pela capacidade tampão de fósforo (CTP) do solo – isto é, a quantidade de P₂O₅ necessária para elevar em 1 mg/dm³ o teor do nutriente (Souza et al., 2016). Embora o impacto da SBF possa ser ainda mais expressivo nessa modalidade, este estudo optou por desconsiderar a adubação corretiva em suas estimativas, dada a complexidade de se extrapolar, em escala nacional, o estoque médio de fósforo nas áreas cultivadas com soja

A adubação de manutenção, por sua vez, é indicada quando o solo já possui níveis adequados de fósforo, sendo necessária apenas a reposição do nutriente para manter o potencial produtivo da área. Nesse caso, a recomendação de adubação varia conforme a classe de disponibilidade do nutriente no solo e a produtividade almejada, assumindo-se o uso do plantio direto bem manejado e sem restrições químicas, físicas ou biológicas. Conforme a Tabela 1, a literatura aponta que cada tonelada de grãos de soja exporta cerca de 15 kg de P_2O_5 . Portanto, para um solo com fósforo adequado e produtividade de 3 t/ha, a dose de manutenção necessária seria de aproximadamente 45 kg de P_2O_5 /ha (Souza et al., 2016)².

Tabela 1. Recomendação de adubação de manutenção de acordo com a classe de disponibilidade de fósforo no solo e a produtividade almejada para a soja no Cerrado.

Produtividade almejada em cultura de soja (t/ha)	Interpretação do teor de P da análise de solo	
	Adequado	Alto
	Dose de P a aplicar no solo (kg de fosfato/ha)	
3	45	30
4	60	40
5	75	50
Taxa do desfrute do P aplicado	100%	150%

Fonte: Souza et al. (2016).

Conforme dados da Conab (2024b), a produtividade média das lavouras de soja no Brasil ultrapassou 3,5 t/ha na safra 2017/2018, mantendo-se em patamar semelhante desde então. Tomando como base uma produtividade de 4,0 t/ha, este estudo adotou como referência a dosagem de manutenção recomendada de 60 kg P_2O_5 /ha. Embora a SBF possa incrementar a absorção de fósforo pelas plantas – reduzindo, em média, 33% a demanda por fertilização (Granada et al., 2018) –, ainda há relativa escassez de investigações empíricas que quantifiquem de forma robusta a magnitude dessa redução no campo.

Este estudo adotou como cenário de referência uma faixa de 30% a 50% de redução na necessidade de adubação fosfatada quando associada à SBF³. Assim, no cenário de economia de 30%, a dose de manutenção passaria de 60 kg para 42 kg de P_2O_5 /ha, representando uma economia de 18 kg/ha. Já no cenário de economia de 50%, a dose seria de 30 kg/ha, correspondendo a uma redução de igual magnitude (30 kg/ha).

Para estimar a economia potencial dessa tecnologia, o cálculo deve contemplar não apenas a poupança física do insumo (18 kg a 30kg de P_2O_5 /ha), mas também a área cultivada e o preço da tonelada de P_2O_5 . Segundo a Conab (2024b), a área plantada com soja no Brasil atingiu 46,1 milhões de hectares na safra 2023/2024.

O cálculo monetário da economia deve incorporar o preço dos fertilizantes fosfatados mais utilizados na agricultura brasileira (SSP, TSP, MAP e DAP)⁴. Como cada fonte possui diferentes teores de P_2O_5 ⁵, torna-se teoricamente inadequado multiplicar o preço de mercado diretamente por 18 kg ou 30 kg de nutriente. Faz-se necessário, portanto, calcular o valor correspondente à quantidade equivalente de fertilizante comercial requerida para suprir essa demanda de fósforo.

Dessa forma, a economia potencial monetizada (EP) é dada por

$$EP_{it} = (p_{it} \cdot A_t) \cdot \left(\frac{Q^*}{Q_{it}} \right)$$

(1)

em que:

- EP_{it} é a economia potencial monetizada (R\$) no tempo t , calculada com base no fertilizante i ;
- A_t corresponde à área (ha) cultivada de soja no tempo t ;
- P_{it} refere-se ao preço (R\$) da tonelada do fertilizante i no tempo t ;

² A recomendação em consideração foi elaborada para o cultivo de soja em região de cerrado e adotada, para as estimativas deste estudo, para o restante do País.

³ Neste trabalho, esse intervalo foi definido como limite inferior, quando considerada a economia de 30%, e limite superior, sob a perspectiva de 50% de economia.

⁴ Para a condução das simulações, as cotações do SSP, TSP e MAP foram obtidos na Conab (2024a), relativas a julho de 2024. Os preços do SSP e do MAP foram coletados para o mercado de Mato Grosso, enquanto o preço do TSP foi referente ao Paraná. Já o preço do DAP foi fornecido pela Argus Brasil Grãos e Fertilizantes (2024), na edição 24-37, de setembro de 2024, considerando o preço da importação, custo e frete (CFR), a granel.

⁵ Os teores de P_2O_5 relativos aos fertilizantes destacados neste trabalho foram retiradas do Anexo I da Instrução Normativa no 39/2018 do Mapa (Brasil, 2018).

- Q^* significa a quantidade de fósforo (P_2O_5) economizada pela tecnologia (18 kg/ha a 30 kg/ha); e
- Q_{it} é a quantidade (kg) de fósforo presente em uma tonelada do fertilizante i no tempo t , obtida com base no teor de P_2O_5 contido no fertilizante i utilizado como parâmetro.

O termo $\frac{Q^*}{Q_{it}}$ expressa a fração da tonelada de fertilizante correspondente à economia proporcionada pela SBF, ou o efeito poupa-terra da tecnologia. Para estimar o impacto tecnológico máximo no aproveitamento do fósforo acumulado no solo, basta considerar Q^* igual a 60 kg/ha. Nessa hipótese extrema, toda a demanda de manutenção da cultura seria suprida pelo estoque de fósforo disponível no solo, zerando a necessidade de complementação química (Souza et al., 2016).

Quanto ao impacto da SBF sobre a produtividade da soja, adotaram-se dados provenientes dos ensaios de campo analisados. Cumpre salientar que tais estudos apresentam heterogeneidade quanto aos produtos avaliados (diferentes tipos de MSP), aos métodos de aplicação, às dosagens e às combinações desses fatores. Ainda assim, todos os ensaios permitiram a comparação direta entre os grupos tratados com SBF e os respectivos grupos controle (sem aplicação), viabilizando a identificação de diferenças de rendimento⁶. Em cada estudo, as variáveis produtividade e quantidade de soja colhida foram medidas, permitindo mensurar o efeito líquido da tecnologia.

Cálculo da descarbonização potencial

A estimativa do impacto econômico decorrente da descarbonização potencial associada ao uso em larga escala da SBF na sojaicultura brasileira considerou as emissões de CO_2eq na cadeia produtiva de fertilizantes fosfatados. Para tanto, foram analisados três setores: i) mineração do fosfato, com base em dados publicados pelo Ibram (2024); ii) produção industrial de fertilizantes fosfatados, conforme os dados metodológicos propostos por Giegrich (2021); e iii) transporte internacional (frete marítimo), a partir de estimativas publicadas pelo United Kingdom (2023).

A soma das emissões provenientes desses três setores fornece a estimativa do CO_2eq associado ao uso de fertilizantes fosfatados para a adubação de manutenção da soja. Para calcular o impacto econômico da descarbonização, foram considerados: i) a quantidade de fósforo economizada (limites inferior e superior); ii) a área plantada de soja; e iii) o preço de mercado dos créditos de carbono.

Dessa forma, a monetização correspondente à descarbonização potencial (DP) obtida pela adoção da SBF pode ser expressa por

$$DP_t = A_t \cdot [(\sum_{j=1}^3 E_j) \cdot Q^*] \cdot pc_t \quad (2)$$

em que:

- DP_t é a descarbonização potencial monetizada (R\$) no tempo t , resultante da adoção da SBF;
- A_t refere-se à área cultivada de soja (ha) no tempo t ;
- $\sum_{j=1}^3 E_j$ corresponde ao somatório das emissões específicas dos três setores: E_1 = setor de mineração; E_2 = setor industrial; e E_3 = setor de transporte, sendo $E_3 = E_t \cdot d$, em que E_t é a emissão gerada por quilômetro percorrido (kg CO_2eq/km), e d é a distância (km) do mercado fornecedor do fertilizante i até o mercado nacional;
- Q^* significa a quantidade de fósforo economizada por hectare (kg P_2O_5/ha) com o uso da SBF na adubação de manutenção; e
- pc_t é o preço do crédito de carbono (R\$/kg CO_2eq) no tempo t .

Análise dos resultados

Economia de fertilizantes fosfatados

A Tabela 2 mostra as estimativas da economia potencial decorrente da redução no uso de fertilizantes fosfatados, considerando as diferentes fontes comerciais e seus respectivos preços. Em julho de 2024, o SSP, com teor de 18% de P_2O_5 , registrou preço médio de R\$ 2.276/t. Uma vez que cada tonelada de SSP contém aproximadamente 180 kg

⁶ Embora este trabalho utilize apenas os parâmetros de produtividade encontrados nos estudos em análise, os demais parâmetros observados estão disponibilizados em Caligaris (2024). É importante ressaltar, ainda, que não houve diferença na dose de adubação entre os grupos tratado e controle. Por esse motivo, não haveria redução de custos com adubação, de forma que não seria adequado somar o impacto de redução de custo (primeira estimativa) com o do aumento de produtividade (segunda estimativa).

Tabela 2. Economia potencial com a utilização de SBF, conforme o tipo de fertilizante (SSP, TSP, MAP e DAP).

Limite	Descrição	Teor de fosfato	Quantidade de fosfato em 1 t do fertilizante	Economia de fosfato para manter a produtividade em 4 t de soja/ha	Participação de economia do fosfato em 1 t do fertilizante	Preço de 1 t do fertilizante	Área cultivada de soja	Economia potencial
	Variável ⁽¹⁾	A	$B = Q_{it}$	$C = Q^*$	$D = C/B.100$	$E = P_{it}$	$F = A_t$	$EP = (D.E.F)/100$
	Unidade	%	Kg	Kg	-	R\$ mil	ha milhão	R\$ bilhão
Inferior (30%)	SSP	18	180	18	10,0	2,3	46,1	10,5
	TSP	41	410	18	4,4	3,0	46,1	6,0
	MAP	48	480	18	3,8	4,3	46,1	7,5
	DAP	45	450	18	4,0	3,6	46,1	6,6
Superior (50%)	SSP	18	180	30	16,7	2,3	46,1	17,5
	TSP	41	410	30	7,3	3,0	46,1	10,0
	MAP	48	480	30	6,3	4,3	46,1	12,5
	DAP	45	450	30	6,7	3,6	46,1	10,9
Máximo (100%)	SSP	18	180	60	33,3	2,3	46,1	35,0
	TSP	41	410	60	14,6	3,0	46,1	20,1
	MAP	48	480	60	12,5	4,3	46,1	25,0
	DAP	45	450	60	13,3	3,6	46,1	21,9

⁽¹⁾ Q_{it} é a quantidade de fosfato (kg) presente em uma tonelada do fertilizante i no tempo t ; Q^* é a quantidade de fosfato a ser economizada pela tecnologia em questão; p_{it} é o preço da tonelada do fertilizante (R\$) i no tempo t ; e A_t é a área cultivada de soja (ha) no tempo t .

Fonte: Souza et al. (2016), Brasil (2018) e Conab (2024b).

de P_2O_5 , a obtenção do equivalente a 18 kg ou 30 kg do nutriente (limites inferior e superior de economia por hectare) requer, respectivamente, 100 kg ou 166 kg do fertilizante comercial.

Sob essa lógica, a economia potencial global foi calculada multiplicando-se a área cultivada de soja pela quantidade de fertilizante comercial poupada por hectare e pelo preço correspondente da tonelada do insumo. Para o SSP, o benefício econômico resultante foi estimado entre R\$ 10,5 bilhões e R\$ 17,5 bilhões.

Quando o cenário considera o TSP, com teor de 41% de P_2O_5 e preço médio de R\$ 2.976/t, a economia potencial varia de R\$ 6,0 bilhões a R\$ 10,0 bilhões. Para o MAP, contendo 48% de P_2O_5 e preço de R\$ 4.343/t, o ganho estimado situa-se entre R\$ 7,5 bilhões e R\$ 12,5 bilhões. No caso do DAP – com 45% de P_2O_5 e cotado a R\$ 3.588/t –, a economia associada à adoção da SBF oscila entre R\$ 6,6 bilhões e R\$ 10,9 bilhões. Vale ressaltar que esses cenários são mutuamente excludentes (não cumulativos), pois refletem estimativas baseadas na substituição isolada de cada fonte de fósforo.

No que concerne ao estoque de fósforo acumulado nos solos agrícolas brasileiros, estima-se

que, desde a década de 1960, um montante equivalente a US\$ 22 bilhões em fertilizantes fosfatados tenha sido incorporado. Especificamente para as áreas destinadas ao cultivo de soja, as estimativas apontam para a presença de até 314 kg de P_2O_5 /ha (Pavinato et al., 2020). A adoção da SBF viabilizaria, em tese, a mobilização desse passivo de fósforo retido no solo, permitindo sua utilização em substituição parcial ou total à adubação de manutenção. Sob essa premissa, estimativas indicam ser possível recorrer a esse estoque residual por até cinco safras consecutivas, reduzindo drasticamente a dependência de fontes minerais solúveis. Considerando uma produtividade de referência de 4,0 t/ha, a estimativa da economia potencial máxima – em um cenário limite de ausência total de adubação de manutenção compensada pela SBF – variaria entre R\$ 20,1 bilhões e R\$ 35,0 bilhões por safra, a depender da fonte de fósforo tomada como parâmetro de substituição.

Aumento de produtividade

Quanto às estimativas de incremento na produtividade da soja decorrentes do uso da SBF, foram analisados os resultados de seis ensaios de

campo⁷ em comparação com seus respectivos grupos controle (sem aplicação de inoculantes). A Tabela 3 mostra a comparação entre o tratamento-controle e os tratamentos com dois tipos de inoculantes (denominados como produto A e produto B)⁸. Os resultados indicaram que o ganho médio de produtividade com a utilização do produto A foi de 6,9%, ao passo que o incremento médio associado ao produto B situou-se em 9,5%. Contudo, ressalta-se que o escopo deste trabalho não visa estabelecer uma comparação mercadológica direta entre as marcas comerciais, visto que a resposta no campo depende de diferentes formulações, doses e métodos de aplicação. Assim, optou-se por calcular uma faixa de incremento médio balizada pelos limites mínimos e máximos de resposta observados nos experimentos. O ganho mínimo estimado foi de 5,9%, enquanto o teto máximo atingiu 10,5% – valores que delimitam a amplitude plausível de resposta produtiva à adoção da SBF em condições reais de cultivo.

Naturalmente, o ganho médio máximo estimado, calculado com base na seleção do produto que apresentou o maior aumento de produtividade em determinada condição, foi superior aos ganhos médios individuais observados para cada produto. Esse efeito foi confirmado no estudo de validação do produto A, desenvolvido pela pesquisa pública

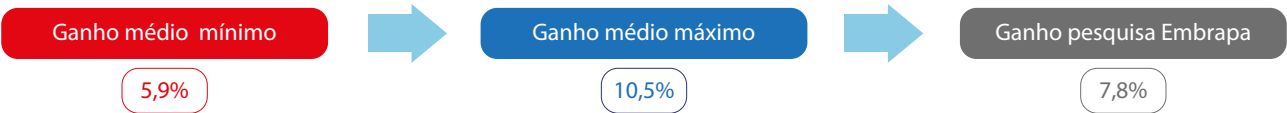
(Cançado, 2021). No caso do estudo da Embrapa, constataram-se ganhos médios de produtividade de 7,8% na safra 2020/2021, com destaque para “o ganho médio econômico com a inoculação [que] foi quase dez vezes superior ao custo da aplicação do produto” (Oliveira-Paiva, 2021b, p.15).

Na safra 2023/2024, a produção de soja no Brasil atingiu 147,7 milhões de toneladas, cultivadas em uma área de 46,1 milhões de hectares, resultando em uma produtividade média de 3,2 t/ha (Conab, 2024b). Considerando o uso em larga escala da SBF, o incremento médio máximo estimado de 10,5% da produtividade resultaria em uma produção adicional de cerca de 15,5 milhões de toneladas de soja. Mantidas constantes as demais condições e tomando como referência o preço médio de R\$ 2.016⁹ por tonelada de soja, esse acréscimo de produção corresponderia a um incremento de receita de R\$ 31,3 bilhões por safra.

A Tabela 4 mostra as projeções de incremento na receita bruta da produção de soja, estimadas com base nas taxas médias de ganho produtivo obtidas nos ensaios de campo. Os resultados evidenciam um acréscimo de faturamento situado entre R\$ 17,7 bilhões e R\$ 31,3 bilhões por safra, a depender da magnitude do incremento de produtividade efetivamente consolidado no campo.

Tabela 3. Ganho de produtividade auferido em estudos do Grupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano (Gapes), em 2023, com a utilização da SBF.

Estudo	Produção do controle (kg/ha)	Produção com A (kg/ha)	Produção com B (kg/ha)	Ganho com A ⁽¹⁾ (%)	Ganho com B ⁽¹⁾ (%)
1	4.329	4.594	4.806	6,1	11,0
2	3.401	3.479	3.494	2,3	2,7
3	4.746	5.340	5.250	12,5	10,6
4	4.338	4.686	4.524	8,0	4,3
5	2.716	2.902	3.163	6,8	16,4
6	4.683	4.937	5.254	5,4	12,2
Ganho médio				6,9	9,5



⁽¹⁾ Valores azuis são máximos; valores vermelhos são mínimos.

⁷ Estudo 1, realizado em Itapetininga, SP; Estudo 2, em Unaí, MG; Estudo 3, em São João da Paraúna, GO; Estudo 4, em Rio Verde, GO; Estudo 5, em Luís Eduardo Magalhães, BA; e Estudo 6, em Canarana, MT.
⁸ O produto A é o BiomaPhos; e o produto B é o Meli-X Turbo.
⁹ Valor de referência de R\$ 120,98 por saca de 60 kg de soja, obtido em julho de 2024 para Mato Grosso. Disponível em: <<https://sisdep.conab.gov.br/precosiagroweb/>>.

Tabela 4. Incremento na receita da produção de soja a partir das médias de ganhos de produtividade com SBF, levantados pelo Gupo Associado de Pesquisa do Sudoeste Goiano (Gapes) em 2023.

Tipo de ganho médio	Incremento (%)	Ganho de produtividade (t milhão)	Aumento da receita (R\$ bilhão)
Máximo	10,5	15,5	31,3
Produto B	8,9	13,2	26,6
Pesquisa Embrapa	7,8	11,5	23,2
Produto A	6,9	10,1	20,5
Mínimo	5,9	8,8	17,7

Obs.: considerou-se a produção de 147,7 milhões de toneladas de soja na safra 2023/2024 e a cotação média de R\$ 2.016,00 por tonelada do grão.
Fonte: Oliveira-Paiva et al. (2021b) e Conab (2024b).

Potencial de descarbonização agrícola via SBF

Quanto ao potencial de mitigação de emissões associado à adoção da SBF, a estimativa contemplou três etapas da cadeia de produção e uso de fertilizantes fosfatados: mineração, industrialização e transporte. Para a fase de mineração, o inventário de emissões considerou as fontes de CO₂eq associadas às combustões estacionária e móvel, emissões fugitivas, mudança no uso do solo, processos industriais, resíduos sólidos, efluentes líquidos e consumo de energia elétrica. Em 2022, a mineração brasileira de fosfato emitiu 323 mil toneladas de CO₂eq, resultando em um fator de emissão de 0,0085 kg de CO₂eq por kg de fosfato minerado (Ibram, 2024). Na etapa de processamento industrial, por sua vez, a fabricação de fertilizantes fosfatados gera aproximadamente 1,56 kg de CO₂eq para cada kg de produto final (Giegrich, 2021).

Quanto ao transporte, a análise restringiu-se ao frete internacional, visto que este representa o principal vetor de emissões adicionais na cadeia de suprimentos. O frete marítimo de graneis sólidos gera, em média, 0,00415 kg de CO₂eq por tonelada de produto transportado a cada quilômetro percorrido (United Kingdom, 2023)¹⁰. Foram examinados três cenários alternativos¹¹: i) fertilizante produzido nacionalmente, sem transporte internacional (emissão nula nessa etapa); ii) importação do Marrocos, considerando a distância de aproximadamente 10.014 km entre os portos de Jorf Lasfar e

Paranaguá¹²; e iii) importação da Rússia, com distância aproximada de 15.657 km entre os portos de São Petersburgo e Paranaguá.

Todos os fatores de emissão – mineração, industrialização e transporte – foram aplicados sobre o peso do fertilizante utilizado. Assim, estimou-se a necessidade de cerca de 2,8 milhões de toneladas de P₂O₅ para atender à adubação de manutenção da soja no Brasil, considerando uma produtividade média de referência. A partir disso, foram simulados três cenários: i) economia máxima, correspondente a 60 kg de P₂O₅ por hectare; ii) cenário de economia superior, com redução de 50% da dose de manutenção; e iii) cenário de economia inferior, com redução de 30% da dose de manutenção.

Com base nesses parâmetros, foi possível estimar a descarbonização potencial monetizada com a adoção da SBF. A Tabela 5 mostra os resultados correspondentes, considerando a diferença entre o uso pleno de fertilizantes químicos e os três cenários alternativos propostos. Para monetizar os benefícios da descarbonização, adotou-se o preço de mercado do Crédito de Carbono Futuro (CFI2Z1), cotado a R\$ 437,70 por tonelada de CO₂eq em negociações internacionais. Ressalte-se que um crédito de carbono corresponde à redução de uma tonelada de CO₂eq emitida.

Na estimativa do impacto econômico potencial da SBF, é fundamental considerar também o custo de aplicação dos inoculantes contendo MSPs. Esse custo médio foi estimado em 0,5 saca

¹⁰ O fator de conversão considera o tamanho do navio. Para a estimativa em questão, consideraram-se navios que tenham peso morto entre 60 mil toneladas e 99 mil toneladas (deadweight – DWT), uma vez que os navios que transportam fertilizantes costumam levar entre 60 mil toneladas e 80 mil toneladas.
¹¹ Além da produção nacional, os maiores fornecedores de fertilizantes fosfatados para o Brasil são Marrocos e Rússia.
¹² Adotou-se o Porto de Paranaguá como referência de destino, por concentrar 24% das importações brasileiras de fertilizantes fosfatados em 2023. Para o cálculo das distâncias, considerou-se que as rotas comerciais reais diferem das rotas geométricas diretas por incorporarem restrições operacionais, canais, áreas de controle de emissões e conexões em portos intermediários (*hubs*). Assim, as distâncias foram definidas com base em estimativas de tráfego marítimo comercial, com acréscimos logísticos de passagens obrigatórias, como os estreitos do Mar Báltico e o Norte da Europa.

Tabela 5. Estimativa de emissões de CO₂eq por setores e descarbonização potencial monetizada para diferentes cenários.

Unidade	Variável	Dose aplicada de fosfato		
ha milhão	A_t	46,1		
R\$/kg CO ₂ eq	p_{ct}	0,4377		
kg CO ₂ eq/kg	E_1	0,0085		
	E_2	1,56		
	E_3	0,00000415		
	$E_1 + E_2 = E_{total}$ (Brasil; 0 km)	1,569		
	$E_1 + E_2 + (E_3.d) = E_{total}$ (Marrocos; 10.014 km)	1,610		
	$E_1 + E_2 + (E_3.d) = E_{total}$ Rússia (15.657 km)	1,633		
Unidades	Cenários	Dose aplicada de fosfato		
		Economia máxima (100%)	limite superior (50% de economia)	limite inferior (30% de economia)
Kg/ha	Q^*	60	30	18
R\$ milhão	Descarbonização potencial (Brasil)	1.901,0	950,5	570,3
	Descarbonização potencial (Marrocos)	1.951,3	975,7	585,4
	Descarbonização potencial (Rússia)	1.979,7	989,9	593,9

Fonte: Souza et al. (2016), Giegrich (2021), United Kingdom (2023), Conab (2024b), Ibram (2024), Investing (2024).

de soja por hectare, tendo como referência o preço de R\$ 700 por litro do produto (BiomPhos, no caso) no distribuidor, e uma dose de aplicação de 100 mL/ha (Oliveira-Paiva, 2021b). Com base nisso e considerando-se a área plantada de soja no Brasil, o custo total da adoção da SBF em larga escala seria da ordem de R\$ 2,8 bilhões por safra.

A Tabela 6 sintetiza os cenários projetados, detalhando os limites mínimos e máximos de ganho de produtividade, a economia potencial gerada pela redução de fertilizantes químicos, o aproveitamento do estoque de fósforo acumulado no solo (limites inferior e superior) e os ganhos econômicos decorrentes da descarbonização. Em todas as estimativas, os valores apresentados são líquidos, tendo sido previamente deduzidos os custos de aplicação dos inoculantes requeridos para a ativação da SBF.

Embora o ganho potencial da SBF seja expressivo – seja pelo incremento de produtividade, pela economia na adubação de manutenção ou pelo aproveitamento do fósforo residual do solo –, ainda faltam evidências científicas que comprovem, de forma categórica, a aditividade simultânea desses benefícios.

Sob a perspectiva tecnológica, o paralelo mais adequado para a SBF é a FBN, visto que ambas são biotecnologias voltadas à nutrição vegetal. Contudo, o retorno econômico da FBN é superior, principalmente por atuar como um substituto pleno da adubação nitrogenada na cultura da soja. A SBF, por sua vez, possui caráter complementar, atuando no aumento da eficiência de aproveitamento do fósforo. Consequentemente, a eficácia da SBF permanece intrinsecamente dependente do estoque de fósforo no sistema (seja residual do solo ou via fertilização), ao passo que a FBN prescinde da adição de fertilizantes nitrogenados sintéticos.

Além disso, a demanda nutricional da soja por nitrogênio é substancialmente superior à de fósforo. Para uma produtividade de 3,0 t/ha, a exigência de nitrogênio é de aproximadamente 420 kg de N/ha (Hungria et al., 2007), comparada a uma dose de reposição de apenas 45 kg de P₂O₅/ha. Essa disparidade quantitativa justifica o maior protagonismo econômico e ambiental da FBN¹³. Ainda assim, a SBF assume relevância estratégica diante de vulnerabilidades de mercado, como escaladas de preços ou riscos de desabastecimento de fertilizantes, cenários nos quais a tecnologia pode mitigar ou

¹³ Os fertilizantes nitrogenados, compostos essencialmente por amônia e ureia, são obtidos por meio de processos químicos altamente eletrointensivos. A síntese desses insumos baseia-se majoritariamente no uso de gás natural ou carvão, o que confere aos nitrogenados uma elevada pegada de carbono e custos de produção superiores aos dos fosfatados. Diante dessa realidade industrial, os dados apresentados evidenciam o papel estratégico da FBN: ao dispensar o uso desses fertilizantes sintéticos de alto custo, essa biotecnologia viabiliza uma operação muito mais econômica e com menor intensidade de emissões de CO₂eq para a atmosfera.

Tabela 6. Consolidação dos ganhos potenciais R\$ (bilhão/ano) com a adoção em larga escala da SBF.

Parâmetro Ganho	Aumento de produtividade		Economia com redução de fertilizantes (economia potencial)		Uso do estoque de fosfato no solo (economia potencial máxima)	
	Ganho médio		Limites		Variação	
	Mínimo	Máximo	Inferior (30%)	Superior (50%)	Mínima	Máxima
Economia potencial	17,7	31,3	6,0	17,5	20,1	35,0
Descarbonização potencial	-	-	0,6	1,0	1,9	2,0
Subtotal (sem custo de aplicação)	17,7	31,3	6,6	18,5	22,0	37,0
Total (com custo de aplicação)	14,9	28,5	3,8	15,7	19,2	34,2

Obs.: o ganho potencial total considera, para todos os parâmetros, o custo com aplicação da SBF de R\$ 2,8 bilhões.

suprir temporariamente a necessidade de adubação fosfatada mineral.

Nos cenários analisados, o ganho máximo estimado com a SBF atingiu R\$ 34,2 bilhões (US\$ 6,1 bilhões)¹⁴, o que equivale a 40,3% dos US\$ 15 bilhões reportados para a FBN em 2020 (Telles et al., 2023). Cabe ressaltar, contudo, duas distinções metodológicas fundamentais entre os estudos: i) as estimativas da FBN integraram o incremento de produtividade e a redução do uso de fertilizantes nitrogenados de forma aditiva, ao passo que para a SBF essa relação cumulativa ainda carece de validação científica; e ii) a FBN apresenta maior maturidade mercadológica e tecnológica, tendo sua adoção disseminada no Brasil desde a década de 1970, enquanto os primeiros produtos comerciais com microrganismos solubilizadores de fosfato foram introduzidos no mercado apenas em 2019.

A trajetória da FBN ilustra o potencial de evolução que pode ocorrer no desenvolvimento de outras tecnologias. Na década de 2000, houve expansão significativa de sua adoção, especialmente depois de 2013, com a coinoculação. A economia atribuída à FBN passou de US\$ 7,2 bilhões em 2010 para US\$ 15,2 bilhões em 2020 (Telles et al., 2023). Assim, em 2023, se a SBF já exibia um potencial de US\$ 6,1 bilhões, é plausível que, à medida que inovações incrementais sejam incorporadas, seu impacto se aproxime do obtido pela FBN em estágios iniciais.

Cabe observar que os cálculos relativos à SBF contemplaram estritamente a adubação de manutenção, desconsiderando a corretiva (fosfatagem),

que demanda volumes substancialmente maiores de fertilizante. Essa premissa conservadora tende a subestimar o impacto econômico potencial da tecnologia. Outro diferencial estratégico da SBF reside na mobilização do estoque de fósforo acumulado no solo, decorrente da fixação histórica do nutriente em frações de baixa labilidade (indisponíveis para as plantas). Enquanto o nitrogênio não se acumula no perfil do solo por causa de perdas por lixiviação e volatilização, o fósforo residual permanece no sistema como uma "poupança" passível de recuperação via SBF. Essa característica confere resiliência à agricultura nacional, atenuando a dependência de importações de fertilizantes fosfatados em períodos de alta volatilidade no mercado internacional.

A relevância econômica da SBF também pode ser dimensionada em comparação ao impacto das biotecnologias desenvolvidas pela Embrapa. Em 2023, o Balanço Social da Empresa reportou um lucro social de R\$ 85,1 bilhões, dos quais R\$ 26,6 bilhões foram decorrentes da FBN e R\$ 1,7 bilhão da SBF (Embrapa, 2024). Diante do potencial estimado neste estudo, projeta-se que o impacto econômico dessas biotecnologias somadas possa superar em breve a marca histórica de R\$ 100 bilhões anuais. Em termos relativos, o retorno social atualmente gerado pela SBF (R\$ 1,7 bilhão) já equivale a 41% de todo o orçamento anual da Embrapa em 2023 (cerca de R\$ 4 bilhões). Sob uma perspectiva prospectiva, caso se considerem apenas os ganhos líquidos de produtividade projetados nesta análise (entre R\$ 14,9 bilhões e R\$ 28,5 bilhões por safra), os benefícios anuais da SBF equivaleriam a uma magnitude

¹⁴ Considerou-se a taxa de câmbio de R\$ 5,65 por dólar norte-americano (USD/BRL), vigente em 30 de agosto de 2024, conforme dados do Banco Central do Brasil (BCB, 2024).

de 3,7 a 7,1 vezes o orçamento anual de custeio da instituição.

Em relação ao Plano Safra 2024/2025, que mobilizou R\$ 400,6 bilhões em crédito, dos quais R\$ 16,3 bilhões com recursos do Tesouro, o custo de aplicar a SBF em toda a área de soja (R\$ 2,8 bilhões) equivaleria a 17,1% da subvenção direta federal. Já os ganhos potenciais de produtividade cobririam entre 91% e 175% desse valor, dependendo do cenário (Brasil, 2024a, 2024b).

Sob a perspectiva macroeconômica, a adoção da SBF tem o potencial de gerar um incremento de 4,3% a 8,2% no VBP da soja, tendo como referência o montante de R\$ 348,7 bilhões registrado em 2023 (IBGE, 2024c). Em termos de comércio exterior, os ganhos potenciais estimados equivaleriam a até 3,0% das exportações agrícolas brasileiras¹⁵. Em escala territorial, a área de soja no Brasil equivale a 72% do território da França, o que ilustra o alcance potencial do bioinsumo.

No campo ambiental, a SBF poderia evitar a emissão de 1,3 a 4,5 milhões de toneladas de CO₂eq por safra, o que representa de R\$ 570 milhões a R\$ 2,0 bilhões em créditos de carbono. Segundo a Itaipu Binacional (2020), esse impacto corresponde a algo entre 3,3% e 11,5% da contribuição de descarbonização gerada pela energia limpa de Itaipu – o equivalente a mitigar até 39 milhões de toneladas de CO₂eq/ano na hipótese de substituição do gás natural. Sob outra perspectiva de comparação, baseada em dados da Unica (2020), o impacto da SBF equivaleria a um intervalo de 4,3% a 15,0% do efeito poupador de emissões proporcionado pelo etanol em substituição à gasolina (estimado em cerca de 30 milhões de toneladas de CO₂eq/ano).

Uma comparação histórica também é elucidativa. Em 1980, o Brasil produziu 14,9 milhões de toneladas de soja, cuja adubação de manutenção teria emitido 845,9 mil toneladas de CO₂eq, resultando em uma relação de 17,6 toneladas de soja para cada tonelada de CO₂eq. Em 2024, a produção atingiu 147,7 milhões de toneladas, com emissão estimada em 4,5 milhões de toneladas de CO₂eq, ou 33,1 toneladas de soja para cada tonelada emitida de CO₂eq. Em quatro décadas, portanto, a eficiência carbono-produtiva da sojicultura brasileira praticamente dobrou.

A Figura 4 mostra a evolução da relação entre a produção de soja e a emissão de CO₂eq decorrente da adubação de manutenção de fosfato. Destacam-se as linhas correspondentes aos limites inferior e superior, que ilustram a economia potencial que a SBF poderia ter proporcionado no passado, considerando uma distância média de importação de fosfato de 10.014 km (Marrocos). Embora à época não existissem produtos comerciais com MSP, a análise revela o quanto a SBF contribuiria para a descarbonização da economia.

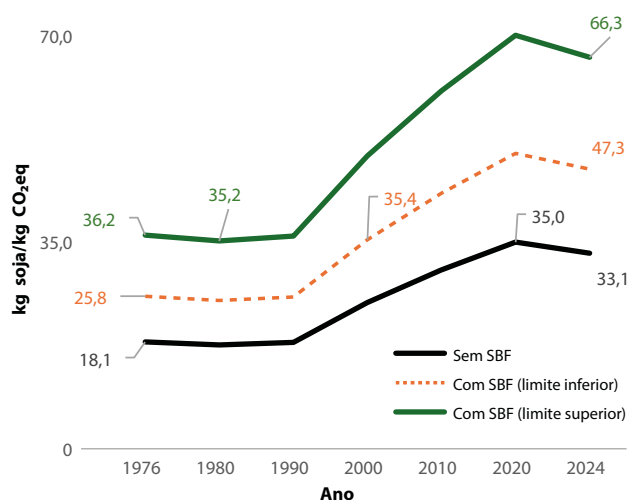


Figura 4. Evolução da produção de soja (kg) por emissão (kg/CO₂eq), com e sem SBF, de 1976 a 2024.

Fonte: Souza et al. (2016), Giegrich (2021), United Kingdom (2023), Conab (2024b), Ibram (2024).

A relação é dada em termos de produção de soja por unidade de emissão de CO₂eq. Observa-se que a SBF teria antecipado a descarbonização do cultivo de soja entre 20 e 40 anos, tomando como referência os anos de 1980, 2000 e 2020. No cenário sem economia pela SBF, em 2020 seriam produzidos 35 kg de soja para cada kg CO₂eq. Já no cenário com economia de 30% (limite inferior), esse patamar seria atingido em 2000, enquanto no cenário com economia de 50% (limite superior), o mesmo marco teria sido alcançado em 1980. Em síntese, no contexto da adubação de manutenção com fosfato, a SBF poderia antecipar significativamente a trajetória de descarbonização da sojicultura brasileira. Kingdom (2023), Conab (2024b), Ibram (2024).

¹⁵ Conversão efetuada com base na taxa de câmbio de R\$ 5,65 por dólar norte-americano (USD/BRL) vigente em 30 de agosto de 2024, conforme dados do Banco Central do Brasil (BCB, 2024).

Em suma, este estudo logrou êxito ao mensurar o impacto potencial decorrente da adoção em larga escala da SBF na cultura da soja no Brasil, integrando com rigor as dimensões econômica e ambiental. Embora a SBF ainda não ostente o mesmo patamar de consolidação mercadológica da FBN, a tecnologia se confirma como uma rota altamente promissora, mesmo em estágio inicial de difusão. Evidencia-se, além disso, que a SBF já viabiliza retornos econômicos tangíveis e com nítida tendência de expansão, impulsionados tanto pela otimização de insumos escassos quanto pelo incremento direto da produtividade agrícola.

Considerações finais

A eficiência dos MSPs pode variar significativamente, a depender de diversos fatores, como as boas práticas de inoculação, a qualidade do produto, as condições climáticas, o pH do solo, a sua composição microbiana e a presença de outros nutrientes, incluindo o nível adequado de fosfato para assegurar um bom plantio. Assim, as conclusões deste estudo não podem ser generalizadas a todas as regiões agrícolas do Brasil sem ajustes específicos.

De todo modo, as estimativas aqui realizadas indicam que a aplicação em larga escala de inoculantes contendo MSPs na cultura da soja teria impactos relevantes, sobretudo no aumento da produção. Entretanto, seu custo não é desprezível e deve ser incorporado nas análises de custo-benefício.

No que se refere à economia potencial decorrente da redução no uso de fertilizantes químicos, os resultados são promissores, mas dependem de múltiplos fatores, como o preço dos insumos e a eficiência da SBF em diferentes condições de solo e clima. Um aspecto particularmente interessante é que a SBF permite ao agricultor economizar com os gastos de uma fertilização fosfatada em períodos de estresse, funcionando como um “substituto momentâneo” ao aproveitar o estoque de fósforo disponível no solo.

O estudo analisou, além disso, o impacto das estimativas geradas pela adoção em larga escala da SBF em perspectiva com outras políticas públicas e parâmetros setoriais. Cabe ressaltar que os inoculantes voltados à FBN já se encontram em um estágio de maturidade comercial consolidado; logo, qualquer análise comparativa de desempe-

nho deve ponderar esses diferentes horizontes de desenvolvimento e difusão tecnológica.

No que se refere à potencial descarbonização pela intensificação da SBF, observa-se que seu impacto direto tende a ser relativamente modesto quando comparado a outros projetos. Todavia, o nível de investimento requerido é também consideravelmente menor. Importa notar que, ao longo dos últimos 50 anos, o aumento da produtividade da soja já contribuiu para a redução da pegada de carbono da cultura. Nesse contexto, a SBF poderia ter antecipado, pelo menos, em até 20 anos o nível de descarbonização relativo à adubação de manutenção com fosfato.

A avaliação incluiu comparações entre os ganhos potenciais da SBF e diferentes indicadores, como macroeconômicos (exportações do agro-negócio), setoriais (receita da produção de soja) e de políticas públicas (recursos do Tesouro destinados ao Plano Safra, lucro social e orçamento da Embrapa). Também foram contrapostos os potenciais de redução de emissões de CO₂eq da SBF com base na geração de energia hidrelétrica e de substituição da gasolina pelo etanol em motores a combustão. Além disso, este estudo viabilizou a sistematização do arcabouço teórico e das estatísticas disponíveis sobre a SBF, consolidando-se como uma investigação exploratória de caráter pioneiro e com resultados inéditos para a literatura nacional.

Como direcionamento para pesquisas futuras, a metodologia desenvolvida neste trabalho apresenta potencial de reaplicação em outras cadeias agrícolas. De fato, estudos conduzidos pela Embrapa já atestam incrementos no rendimento de diversas culturas decorrentes do uso da SBF. Para o milho, o ganho médio de produtividade alcançou 8,6% (Oliveira, 2020). Na cultura da cana-de-açúcar (Oliveira, 2020) e do feijoeiro (Bittencourt et al., 2022), também foram evidenciadas respostas produtivas positivas quando a SBF foi adotada de forma combinada a apenas 50% da dose recomendada de adubação fosfatada.

Paralelamente, abre-se espaço para quantificar o impacto econômico de outros bioinsumos, cada vez mais relevantes, bem como para aprofundar análises sobre o nível de reposição de fosfato em lavouras de soja fora do Cerrado, incluindo a mensuração de economias potenciais decorrentes da mobilização, pela SBF, do estoque de fósforo acumulado no solo. Ressalta-se, entretanto, a ca-

rência de pesquisas que quantifiquem a redução efetiva do uso de fertilizantes decorrente da SBF, especialmente em sistemas tropicais como o brasileiro, e que atestem sua correlação direta com o aumento da produtividade.

Outro ponto a ser aprofundado diz respeito aos custos de desenvolvimento de tecnologias voltadas ao agronegócio, viabilizadas por investimentos públicos. Este estudo mostrou que a SBF já se paga em termos de lucro social e que, em breve, seus benefícios tendem a superar todo o orçamento da Embrapa.

Espera-se, portanto, que esses achados incentivem não apenas a adoção dessa tecnologia em larga escala, mas também o fomento a pesquisas, inovações e desenvolvimento de novos bioinsumos – seja na nutrição de plantas, seja nos diferentes elos da cadeia do agronegócio nacional.

Referências

- ALVES, E. Embrapa: a successful case of institutional innovation. *Revista de Política Agrícola*, ano19, p.64-72, 2010. Special Edition of Mapa's 150th Anniversary.
- ANDA. Associação Nacional para Difusão de Adubos. *Pesquisa Setorial*. São Paulo, 2024. Disponível em: <<https://anda.org.br/recursos/>>. Acesso em: 29 set. 2024.
- ARGUS BRASIL GRÃOS E FERTILIZANTES. [S.l.]: Argus, ed.24-37, 13 set. 2024. 21p.
- BCB. Banco Central do Brasil. *Cotação de moedas*. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidade/financeira/cotacoes/moedas>>. Acesso em: 29 set. 2024.
- BERNARDI, A.C. de C.; MACHADO, P.L.O. de A.; SILVA, C.A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JUNIOR, E. de; PERES, J.R.R. (Ed). *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. p.61-77. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1124243>>. Acesso em: 29 set. 2024
- BINI, D.; VARÓN LOPEZ, M. Transformações microbianas do fósforo. In: CARDOSO, E.J.B.N.; ANDREOTE, F.D. *Microbiologia do solo*. 2.ed. Piracicaba: ESALQ, 2016. p.149-166.
- BITTENCOURT, C.D.; OLIVEIRA, M.M. de; NUNES, M.G.C.; FERREIRA, E.P. de B. Desempenho de inoculante solubilizador de fosfato no crescimento e produção do feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.). In: SEMINÁRIO JOVENS TALENTOS, 16., 2022, Santo Antônio de Goiás. *Resumos*. Brasília: Embrapa; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2022. p.75.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Plano Safra 2023/2024*: apresentação. Brasília, 2024a.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. *Plano Safra 2024/2025*. Brasília, 2024b.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa nº 39, de 8 de agosto de 2018. [Estabelece regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura]. *Diário Oficial da União*, 10 ago. 2018. Seção 1, p.19-32.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Plano Nacional de Fertilizantes 2050*: uma estratégia para os fertilizantes no Brasil. Brasília: SDIC/MDIC, 2023.
- CALIGARIS, B.S.A. *Agricultura, fertilizantes e solubilização de fosfato*: a próxima revolução no campo. 2024. 66p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília.
- CANÇADO, G.M. de A.; VASCONCELOS, J.C.S.; PAIVA, C.A.O.; CRISTOFOLETTI, D.; SEVERINO, F.J.; PINTO JUNIOR, A.S.; MEDEIROS, G. de; BARBOSA, L.A.F.; SPERANZA, E.A.; ANTUNES, J.F.G. *Utilização de inoculante líquido solubilizador de fosfato formulado a base dos isolados de Bacillus megaterium (b119) Bacillus subtilis (b2084) no plantio da cana-de-açúcar*. Campinas: Embrapa Agricultura Digital, 2021. (Embrapa Agricultura Digital. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 49).
- CEPEA. Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. *PIB do agronegócio brasileiro*. Piracicaba, 2024.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. *Série histórica da soja*. Brasília, 2024b. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>>. Acesso em: 29 set. 2024.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. *Insumos agropecuários*. 13 ago. 2024a. Disponível em: <<https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultainsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- CORRÊA, J.C.; MAUAD, M.; ROSOLEM, C.A. Fósforo no solo e desenvolvimento de soja influenciados pela adubação fosfatada e cobertura vegetal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.39, p.1231-1237, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200010>.
- DÖBBEREINER, J. Potential for nitrogen fixation in tropical legumes and grasses. In: DÖBBEREINER, J.; BURRIS, R.H.; HOLLAENDER, A.; FRANCO, A.A.; NEYRA, C.A.; SCOTT, D.B. (Ed.). *Limitations and potentials for biological nitrogen fixation in the tropics*. Boston: Springer, 1978. p.13-24. (Basic Life Sciences, v.10). DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8957-0_3.
- DÖBBEREINER, J.; DUQUE, F.F. Contribuição da pesquisa em fixação biológica de nitrogênio para o desenvolvimento do Brasil. *Revista de Economia Rural*, v.18, p.447-460, 1980. Disponível em: <<https://ageconsearch.umn.edu/record/264517/files/5.pdf>>. Acesso em: 7 nov. 2023.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Balanco Social 2023*. 27.ed. Brasília: Embrapa Superintendência de Comunicação, Superintendência de Estratégia, 2024. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1163847/1/BS-2023.pdf>>. Acesso em: 29 set. 2024
- FISHLOW, A.; VIEIRA FILHO, J.E.R. *Agriculture and industry in Brazil*: innovation and competitiveness. New York: Columbia University Press, 2020. 244p.
- GIEGRICH, J. *Manual da calculadora de emissões de GEE para resíduos*: ferramenta de Cálculo de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Manejo de RSU para o Brasil: metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Brasília: MDR, 2021.
- GLOBALFERT. *Outlook GlobalFert 2024*. 5.ed. [S.l.], 2024.
- GLOBALFERT. *Principais empresas produtoras de fertilizantes no mundo em 2022*. [S.l.], 2022.

- GRANADA, C.; PASSAGLIA, L.M.P.; SOUZA, E.M. de; SPEROTTO, R.A. Is phosphate solubilization the forgotten child of plant growth-promoting rhizobacteria? *Frontiers in Microbiology*, v.9, art.2054, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02054>.
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. **A importância do processo de fixação biológica do nitrogênio para a cultura da soja: componente essencial para a competitividade do produto brasileiro.** Londrina: Embrapa Soja, 2007. (Embrapa Soja. Documentos, 283).
- HUNGRIA, M.; CAMPO, R.J.; MENDES, I.C. **Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja.** Londrina: Embrapa Soja, 2001. (Embrapa Soja. Circular técnica, 35; Embrapa Cerrados. Circular técnica, 13).
- HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A.; ARAUJO, R.S. Co-inoculation of soybeans and common beans with rhizobia and azospirilla: strategies to improve sustainability. *Biology and Fertility of Soils*, v.49, p.791-801, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0771-5>.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **[IBGE explica o PIB]**. Rio de Janeiro, 2024a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua – PNAD Contínua.** Rio de Janeiro, 2024b.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agropecuária: ranking agrícola: valor da produção (2023).** Rio de Janeiro, 2024c. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor mineral 2024: ano base 2022.** Brasília, 2024.
- INVESTING. Disponível em: <www.investing.com>. Acesso em: 29 set. 2024.
- ITAIPIU BINACIONAL. **Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos: estudo de caso: Itaipu e o ODS 13.** Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, 2020. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/af_df/Estudo_de_caso_Itaipu_ODS_13.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- LAVAKUSH; YADAV, J.; VERMA, J.P.; JAISWAL, D.K.; KUMAR, A. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa*). *Ecological Engineering*, v.62, p.123-128, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.013>.
- MARIN, R. da S.F.; BAHRY, C.A.; NARDINO, M.; ZIMMER, P.D. Efeito da adubação fosfatada na produção de sementes de soja. *Revista Ceres*, v.62, p.265-274, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562030006>.
- MARIN, V.A.; BALDANI, V.L.D.; TEIXEIRA, K.R. dos S.; BALDANI, J.I. **Fixação biológica de nitrogênio: bactérias fixadoras de nitrogênio de importância para a agricultura tropical. Seropédica:** Embrapa-CNPAB, 1999. 24p. (Embrapa-CNPAB. Documentos, 91). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/598661>>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- MENDES, I. de C.; REIS JUNIOR, F.B. dos. **Microorganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: uma análise crítica.** Planaltina: Embrapa, 2003. (Embrapa Cerrados. Documentos, 85).
- OGINO, C.M.; GASQUES, J.G.; VIEIRA FILHO, J.E.R. **Relação dinâmica: fertilizantes minerais e agricultura brasileira.** Brasília: Ipea, 2023. (Ipea. Texto para Discussão, n.2928). Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/12502>>. Acesso em: 3 mar. 2026.
- OLIVEIRA, C.A. de; COTA, L.V.; MARRIEL, I.E.; GOMES, E.A.; SOUSA, S.M. de; LANA, U.G. de P.; SANTOS, F.C. dos; PINTO JUNIOR, A.S.; ALVES, V.M.C. **Viabilidade técnica e econômica do BiomaPhos (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) nas culturas de milho e soja.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 210).
- OLIVEIRA, C.A.; ALVES, C.M.V.; MARRIEL, I.E.; GOMES, E.A.; SCOTTI, M.R.; CARNEIRO, N.P.; GUIMARÃES, C.T.; SCHAFFERT, R.E.; SÁ, N.M.H. Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. *Soil Biology and Biochemistry*, v.41, p.1782-1787, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.01.012>.
- OLIVEIRA-PAIVA, C.A. de; BINI, D.; MARRIEL, I.E.; GOMES, E.A.; SANTOS, F.C. dos; COTA, L.V.; SOUSA, S.M. de; ALVES, V.M.C.; LANA, U.G. de P.; SOUZA, F.F. de. **Inoculante à base de bactérias solubilizadoras de fosfato nas culturas do milho e da soja (BiomaPhos): dúvidas frequentes e boas práticas de inoculação.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021a. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 252).
- OLIVEIRA-PAIVA, C.A. de; COTA, L.V.; MARRIEL, I.E.; ALVES, V.M.C.; GOMES, E.A.; SOUSA, S.M. de; SANTOS, F.C. dos; SOUZA, F.F. de; LANDAU, E.C.; PINTO JUNIOR, A.S.; LANA, U.G. de P. **Validação da recomendação para o uso do inoculante BiomaPhos (*Bacillus subtilis* CNPMS B2084 e *Bacillus megaterium* CNPMS B119) na cultura da soja.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021b. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 279).
- PAIVA, C.A. de O.; MARRIEL, I.E.; GOMES, E.A.; COTA, L.V.; SANTOS, F.C. dos; TINOCO, S.M. de S.; LANA, U.G. de P.; OLIVEIRA, M.C.; MATTOS, B.B.; ALVES, V.M.C.; RIBEIRO, V.P.; VASCO JUNIOR, R. **Recomendação agrônômica de cepas de *Bacillus subtilis* (CNPMS B2084) e *Bacillus megaterium* (CNPMS B119) na cultura do milho.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2020. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 260).
- PASTORE, A.C. **Erros do passado, soluções para o futuro: a herança das políticas econômicas brasileiras do século XX.** São Paulo: Portfolio-Penguin, 2021. 343p.
- PATIL, P.M.; KULIGOD, V.B.; HEBSUR, N.S.; PATIL, C.R.; KULKARNI, G.N. Effect of phosphate solubilizing fungi and phosphorus levels on growth, yield and nutrient content in maize (*Zea mays*). *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, v.25, p.58-62, 2012.
- PAVINATO, P.S.; CHERUBIN, M.R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G.C.; CHADWICK, D.R.; JONES, D.L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. *Scientific Reports*, v.10, art.15615, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>.
- SANTOS, M.S.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Microbial inoculants: reviewing the past, discussing the present and previewing an outstanding future for the use of beneficial bacteria in agriculture. *AMB Express*, v.9, art.205, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0932-0>.
- SANTOS, M.S.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Outstanding impact of *Azospirillum brasiliense* strains Ab-V5 and Ab-V6 on the Brazilian agriculture: lessons that farmers are receptive to adopt new microbial inoculants. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.45, e0200128, 2021. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200128>.

SOUZA, D.M.G. de; NUNES, R. de S.; REIN, T.A.; SANTOS JÚNIOR, J. de D.G. dos. **Manejo da adubação fosfatada para culturas anuais no cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2016. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 33).

SRINIVAS, S.; VIEIRA FILHO, J.E.R. **Farms versus firms in economic development**: the assumptions and consequences of learning dynamics in agriculture and manufacturing. Brasília: Ipea, 2015. (Ipea. Discussion paper, 207).

TELLES, T.S.; NOGUEIRA, M.A.; HUNGRIA, M. Economic value of biological nitrogen fixation in soybean crops in Brazil. **Environmental Technology & Innovation**, v.31, art.103158, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103158>.

UNITED KINGDOM. Department for Energy Security and Net Zero. **Greenhouse gas reporting**: conversion factors 2023. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>>. Acesso em: 3 mar. 2026.

USO do etanol evita 515 milhões de toneladas de CO₂. **Unica**, 5 jun. 2020. Disponível em: <<https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>>. Acesso em: 3 mar. 2026.

VASCONCELOS, M.J.V. de; FIGUEIREDO, J.E.F.; OLIVEIRA, M.F. de. **Estudos bioquímicos e morfológicos em genótipos de milho contrastantes para a eficiência do uso de fósforo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. (Embrapa Milho e Sorgo. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 228).

VIEIRA FILHO, J.E.R. A produção de soja e sua importância na economia brasileira. **Revista de Política Agrícola**, v.33, e01962, 2024.

WANG, Z.; ZHANG, H.; LIU, L.; LI, S.; XI, J.; XUE, X.; JIANG, Y. Screening of phosphate-solubilizing bacteria and their abilities of phosphorus solubilization and wheat growth promotion. **BMC Microbiology**, v.22, art.296, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12866-022-02715-7>.