

Eficiência Técnica e Gap Tecnológico na Produção de Soja: Uma análise comparativa entre adotantes e não adotantes de sistema de integração Lavoura-Pecuária

Technical Efficiency and Technology Gap in Soybean Production: A comparative analysis of adopters and non-adopters of Crop–Livestock Integration Systems

Larissa Aparecida Lopes de Souza

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil

Marcelo José Carrer

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil

Marcela de Melo Brandão Vinholis

Embrapa Pecuária Sudeste (EMBRAPA), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil

Hildo Meirelles de Souza Filho

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil

Leticia Caroline da Silva David

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo (SP), Brasil

GT3. Evolução, estrutura, competitividade e dinâmica das cadeias agroindustriais

Resumo: A Integração Lavoura–Pecuária (ILP) tem sido promovida como estratégia para ampliar a eficiência no uso de recursos e a sustentabilidade da agricultura brasileira. No entanto, ainda são limitadas as evidências empíricas que avaliam seu desempenho produtivo considerando a heterogeneidade tecnológica entre sistemas. Este estudo investiga a associação da adoção de sistemas ILP e a eficiência técnica e o gap tecnológico na produção de soja no estado de São Paulo. Foram utilizados microdados primários coletados junto a 152 produtores na safra 2023/24. Inicialmente, estimaram-se fronteiras estocásticas de produção separadamente para os dois grupos, com correção de seletividade amostral. Em seguida, aplicou-se a abordagem de metafronteira para mensurar o gap tecnológico e a eficiência técnica global. Os resultados indicam que os adotantes de sistemas ILP apresentam eficiência técnica média significativamente superior (0,74) em comparação aos não adotantes (0,68). Por outro lado, o gap tecnológico é maior entre os adotantes (*technology gap ratio* de 0,83 para adotantes e 0,90 para não adotantes), o que indica maior distância em relação à fronteira tecnológica máxima. Quando se considera a eficiência técnica global, não se observam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos, sugerindo que os ganhos de eficiência entre os adotantes de ILP são compensados por um maior distanciamento tecnológico. Esses resultados indicam que a ILP contribui para o uso mais eficiente dos recursos produtivos, possivelmente em função de sinergias entre atividades, ainda que não implique, no curto prazo, em superioridade em termos de desempenho produtivo global. O estudo contribui ao incorporar a heterogeneidade tecnológica na avaliação da eficiência, oferecendo uma análise mais abrangente das diferenças de desempenho entre sistemas produtivos e subsídios para estratégias de intensificação sustentável da agricultura.

Palavras-chave: Integração Lavoura–Pecuária (ILP), eficiência técnica, gap tecnológico, agricultura sustentável.

Abstract: Crop–Livestock Integration (CLI) has been promoted as a strategy to enhance resource-use efficiency and the sustainability of Brazilian agriculture. However, empirical evidence assessing its productive performance while accounting for technological heterogeneity across systems remains limited. This study investigates the association between the adoption of CLI systems, technical efficiency, and the technological gap in soybean production in the state of São Paulo. Primary microdata collected from 152 producers during the 2023/24 crop season were used. Initially, stochastic production frontiers were estimated separately for the two groups, incorporating sample selection correction. Subsequently, a metafrontier approach was applied to measure the technological gap and overall technical efficiency. The results indicate that adopters of CLI systems exhibit significantly higher average technical efficiency (0.74) compared to non-adopters (0.68). On the other hand, the technological gap is larger among adopters (*technology gap ratio* of 0.83 for adopters and 0.90 for non-adopters), indicating a greater distance from the maximum technological frontier. When considering overall technical efficiency, no statistically significant differences are observed between the groups, suggesting that efficiency gains among CLI adopters are offset by a greater technological distance. These findings indicate that CLI contributes to a more efficient use of productive resources, possibly due to synergies between activities, although it does not imply short-term superiority in terms of overall productive performance. The study contributes by incorporating technological heterogeneity into the assessment of efficiency, offering a more comprehensive analysis of

performance differences across production systems and providing insights for sustainable agricultural intensification strategies.

Keywords: Crop–Livestock Integration (CLI), technical efficiency, technology gap, sustainable agriculture.

1. Introdução

A avaliação da eficiência produtiva na agricultura requer considerar explicitamente a heterogeneidade tecnológica entre sistemas de produção, uma vez que produtores podem operar sob diferentes regimes tecnológicos (BRAVO-URETA; GREENE; SOLÍS, 2012; VILLANO et al., 2019). Essas diferenças implicam não apenas distintas combinações de insumos, mas também variações na própria função de produção (CARRER et al., 2022). Nesse contexto, abordagens que assumem uma tecnologia comum podem gerar comparações enviesadas de desempenho, tornando essencial distinguir entre eficiência técnica e diferenças estruturais associadas ao nível tecnológico (BRAVO-URETA; GREENE; SOLÍS, 2012; VILLANO et al., 2019; CARRER et al., 2022).

A Integração Lavoura–Pecuária (ILP) insere-se nesse debate como um sistema produtivo que combina atividades agrícolas e pecuárias na mesma área, de forma planejada, em rotação, sucessão ou consórcio, promovendo complementaridades biofísicas e econômicas (BALBINO et al., 2011; CARRER et al., 2020; VINHOLIS et al., 2021a). Ao reorganizar os fluxos de matéria, energia e capital dentro da propriedade rural, a ILP pode gerar sinergias produtivas associadas à ciclagem de nutrientes, à melhoria da fertilidade do solo e à intensificação do uso da terra (YANG et al., 2022; DHEHIBI et al., 2023; DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ et al., 2025). Evidências indicam que, em ambientes tropicais, esses ganhos podem ser cumulativos ao longo do tempo, refletindo alterações estruturais na função de produção (CARMONA et al., 2016).

Do ponto de vista econômico, sistemas integrados permitem explorar economias de escopo e diversificação produtiva, reduzindo riscos associados a oscilações de preços e choques climáticos (VILLANO et al., 2019; ALARY et al., 2020; CARRER et al., 2020). No entanto, sua implementação envolve maior complexidade gerencial e requer níveis mais elevados de coordenação produtiva (CARRER et al., 2020; VINHOLIS et al., 2021a). Essas características sugerem que produtores que operam com ILP podem diferir daqueles que mantêm sistemas especializados, tanto em termos de eficiência no uso dos insumos quanto em relação à tecnologia de produção adotada.

No Brasil, estima-se que entre 60% e 70% das pastagens apresentem algum grau de degradação, o que compromete a eficiência da pecuária e limita o desempenho econômico das propriedades rurais (SOARES et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2022). Nesse contexto, a ILP tem

sido promovida como estratégia de intensificação sustentável, com destaque para o Plano ABC e o Plano ABC+ (2020–2030), que estabelecem metas para a expansão de sistemas produtivos de baixa emissão de carbono (MOZZER, 2011; CARAUTA et al., 2021; VINHOLIS et al., 2021a).

Apesar dos benefícios amplamente documentados, ainda são limitadas as evidências empíricas que avaliam o desempenho produtivo da ILP sob a ótica da eficiência técnica, especialmente quando se considera a heterogeneidade tecnológica entre sistemas produtivos. Produtores adotantes e não adotantes podem operar sob tecnologias distintas, o que implica funções de produção diferentes e dificulta comparações diretas de desempenho (VILLANO et al., 2019; CARRER et al., 2022).

Nesse sentido, a literatura tem enfatizado o uso de modelos de fronteira estocástica combinados à abordagem de metafronteira como estratégia para lidar com a heterogeneidade tecnológica, permitindo comparar produtores que operam sob diferentes regimes produtivos (BRAVO-URETA, GREENE e SOLÍS, 2012; CARRER et al., 2022; VILLANO et al., 2019). Essa abordagem possibilita decompor o desempenho produtivo em eficiência técnica e gap tecnológico, distinguindo entre ganhos associados ao uso mais eficiente dos fatores de produção e diferenças estruturais na tecnologia empregada.

Diante desse cenário, o presente estudo analisa a eficiência técnica e o gap tecnológico na produção de soja no estado de São Paulo, com base em microdados primários coletados junto a 152 produtores na safra 2023/24. Para isso, são estimadas fronteiras estocásticas de produção separadamente para produtores adotantes e não adotantes da ILP, seguidas da aplicação de uma metafronteira comum, que permite comparar o desempenho produtivo entre os diferentes sistemas.

O estudo contribui para a literatura ao avaliar a eficiência produtiva sob heterogeneidade tecnológica, permitindo uma análise mais consistente das diferenças de desempenho entre sistemas de produção agrícolas. Adicionalmente, avança em relação à literatura ao combinar dados primários recentes com a estimação de fronteiras estocásticas com correção de seletividade amostral e abordagem de metafronteira, possibilitando a avaliação conjunta da eficiência técnica e das diferenças tecnológicas entre sistemas produtivos. Os resultados oferecem subsídios para a formulação de estratégias voltadas à intensificação sustentável da produção de soja no contexto brasileiro.

O artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 descreve a base de dados e a estratégia metodológica, incluindo a estimação das fronteiras estocásticas e a abordagem de

metafronteira. A Seção 3 apresenta e discute os resultados empíricos. Por fim, a Seção 4 apresenta as conclusões e implicações para políticas públicas.

2. Metodologia

A metodologia adotada neste estudo foi delineada para analisar a eficiência técnica das propriedades produtoras de soja no estado de São Paulo, considerando a heterogeneidade tecnológica entre sistemas produtivos. Para isso, emprega-se uma estratégia econométrica baseada na estimação de fronteiras estocásticas de produção, combinada à abordagem de metafronteira. Esta abordagem metodológica possibilita a comparação do desempenho produtivo entre grupos que operam sob diferentes regimes tecnológicos. Essa abordagem segue as contribuições de Bravo-Ureta, Greene e Solís (2012), Bravo-Ureta et al. (2020), Villano et al. (2019) e Carrer et al. (2022).

Inicialmente, são estimadas fronteiras estocásticas de produção separadamente para ambos os grupos de produtores: adotantes e não adotantes de sistemas ILP. A fronteira estocástica possibilita decompor o termo de erro em dois componentes: um associado a choques aleatórios fora do controle do produtor e outro relacionado à ineficiência técnica, refletindo o grau de afastamento da fronteira de produção. Quando os produtores operam sob tecnologias distintas, a utilização de uma única fronteira comum pode gerar estimativas enviesadas de eficiência, ao não considerar diferenças estruturais entre os sistemas produtivos. Nesse contexto, a abordagem de metafronteira permite a comparação entre grupos heterogêneos ao definir uma fronteira tecnológica potencial comum. A partir dessa estrutura, torna-se possível decompor o desempenho produtivo em eficiência técnica relativa à fronteira do grupo e em diferença tecnológica, mensurada pelo *technology gap ratio* (TGR).

Essa estratégia possibilita uma avaliação mais abrangente do desempenho produtivo, ao distinguir entre ganhos associados ao uso mais eficiente dos fatores de produção e aqueles decorrentes de diferenças na tecnologia empregada. Dessa forma, a abordagem adotada permite analisar de forma consistente a eficiência técnica e o gap tecnológico entre sistemas produtivos, oferecendo evidências sobre as diferenças de desempenho na produção de soja.

2.1 Amostra

Este estudo baseia-se em microdados primários de natureza transversal, obtidos a partir de levantamento de campo com produtores de soja no estado de São Paulo, referentes à safra 2023/2024. A coleta de informações foi realizada por meio de entrevistas presenciais

conduzidas diretamente nas propriedades rurais, procedimento adotado com o objetivo de garantir maior precisão das respostas e reduzir potenciais vieses de mensuração.

O instrumento de coleta consistiu em um questionário estruturado, abrangendo informações sobre características produtivas, práticas de manejo, uso de tecnologias, aspectos de gestão, condições institucionais e perfil dos produtores. Em particular, foram coletados dados que permitem identificar a adoção de sistemas de Integração Lavoura–Pecuária, bem como variáveis relevantes para a análise de diferenças tecnológicas e de desempenho produtivo entre as propriedades.

A definição do tamanho da amostra seguiu o procedimento de amostragem aleatória simples para população finita, conforme proposto por Israel (1992). Considerou-se como população de referência um total de 17.268 produtores de soja no estado de São Paulo, com base nos dados da LUPA (2017). Adotaram-se nível de confiança de 95%, margem de erro de 10% e proporção populacional conservadora ($p = 0,5$). O tamanho mínimo da amostra foi calculado de acordo com a seguinte expressão:

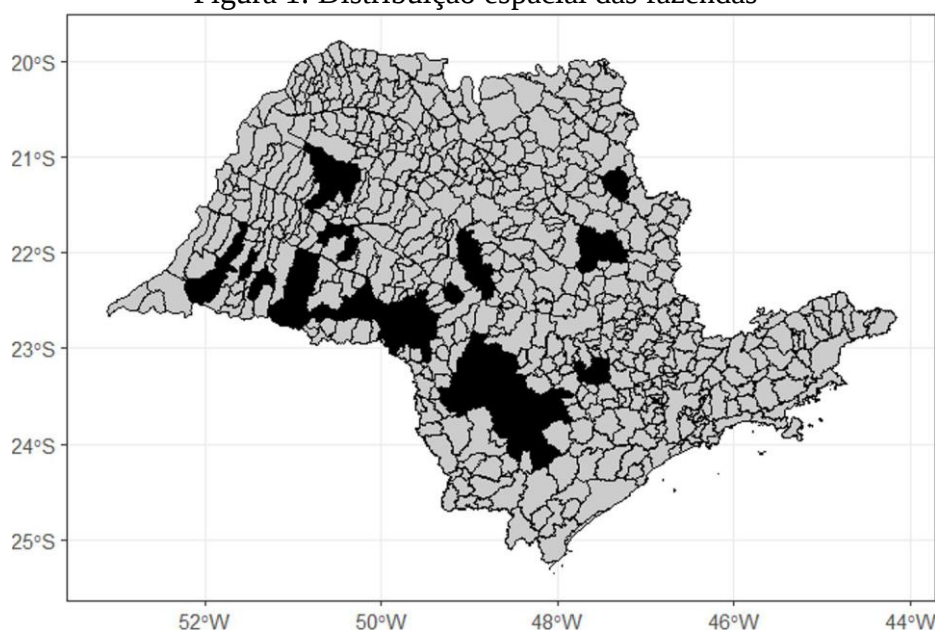
$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{E^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (1)$$

Em que n representa o tamanho da amostra, N o tamanho da população, Z o valor da distribuição normal associado ao nível de confiança, E a margem de erro amostral, p a proporção estimada da característica de interesse e $q = 1 - p$. Nessas condições, o tamanho mínimo requerido foi de 96 propriedades, sendo a amostra final composta por 152 produtores entrevistados presencialmente.

Devido à inexistência de uma base pública atualizada que permitisse a seleção aleatória direta dos produtores, o acesso às propriedades ocorreu com o apoio de cooperativas agrícolas, serviços de extensão rural, empresas de assistência técnica e fornecedores de insumos, que disponibilizaram listas de contatos. A partir dessas listas, procedeu-se à seleção dos produtores incluídos na amostra.

A coleta de dados foi realizada entre maio e outubro de 2024, abrangendo propriedades localizadas em 55 municípios do estado de São Paulo. A distribuição espacial das unidades amostrais é apresentada na Figura 1.

Figura 1: Distribuição espacial das fazendas



Fonte: dados da pesquisa.

2.2 Modelo econométrico

A avaliação da associação da adoção dos sistemas ILP com a eficiência técnica é conduzida por meio do modelo de fronteira estocástica de produção com correção de seletividade amostral, conforme proposto por Greene (2010). Essa abordagem é particularmente adequada quando fatores não observáveis influenciam simultaneamente a decisão de adoção tecnológica e o desempenho produtivo, gerando estimativas viesadas caso a seleção não seja tratada adequadamente.

A estrutura econométrica incorpora um mecanismo de correção de seletividade amostral, no qual a alocação dos produtores entre os regimes tecnológicos é modelada por uma equação de seleção latente:

$$d_i = 1[\alpha'z_i + w_i > 0], w_i \sim N(0,1) \quad (2)$$

em que d_i é uma variável binária indicadora da adoção de sistemas ILP pelos produtores rurais da amostra, z_i é um vetor de variáveis explicativas da decisão de adoção, α é um vetor de parâmetros a serem estimados e w_i é o termo de erro aleatório. A equação de seleção não constitui o foco analítico do estudo, sendo utilizada exclusivamente como mecanismo para correção de viés de seleção amostral na estimação das fronteiras estocásticas.

A fronteira estocástica de produção é especificada na forma Cobb–Douglas e estimada separadamente para adotantes e não adotantes de ILP:

$$y_i = \beta'x_i + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2) \quad (3)$$

em que y_i é o nível de produção da propriedade i , x_i é um vetor de fatores de produção e β são os parâmetros tecnológicos da função de produção. O termo de erro composto é definido como:

$$\varepsilon_i = v_i - u_i \quad (4)$$

onde v_i representa o ruído estatístico e $u_i \geq 0$ captura a ineficiência técnica. Admite-se a possibilidade de correlação entre o termo de erro da equação de seleção w_i e o componente aleatório da fronteira de produção (v_i). A significância estatística do parâmetro de correlação indica a presença de viés de seletividade amostral, cuja correção é essencial para a obtenção de estimativas consistentes da eficiência técnica.

A partir das estimativas do modelo, o índice de eficiência técnica (TE) de cada propriedade é calculado como:

$$TE_{ij} = \frac{y_{ij}}{y_{ij}^{MAX}} = \frac{e^{x_{ij}\beta_{ij}-u_{ij}+v_{ij}}}{e^{x_{ij}\beta_{ij}+v_{ij}}} = e^{-u_{ij}} \quad (5)$$

em que TE_{ij} corresponde à eficiência técnica da propriedade i estimada a partir da fronteira específica do grupo j (adotantes ou não adotantes de ILP). Embora os índices de eficiência técnica permitam comparações dentro de cada grupo tecnológico, a comparação direta entre adotantes e não adotantes não é imediata, uma vez que esses grupos operam sob tecnologias potencialmente distintas.

Para possibilitar a comparação do desempenho produtivo entre propriedades que operam sob diferentes tecnologias, adota-se a abordagem de metafronteira de produção, conforme proposta por O'Donnell, Rao, Battese (2008), Huang et al. (2014), Villano et al. (2015) e Carrer et al. (2022). A metafronteira representa a melhor tecnologia disponível no conjunto da amostra, funcionando como a envoltória superior das fronteiras específicas de cada grupo.

A função metafronteira é expressa como:

$$f_j^*(x_{ij}) = f^M(x_{ij}, \beta^M) + v_{ij}^M - u_{ij}^M \quad (6)$$

em que $f_j^*(x_{ij})$ é a produção da propriedade rural i estimado pela equação de fronteira de produção (4) para o grupo j . Ou seja, este é o produto máximo da propriedade i diante da tecnologia de produção que ela adota. $f^M(.)$ é a tecnologia da metafronteira, a qual, por definição, é superior às tecnologias das fronteiras específicas; x_{ij} é um vetor de fatores de produção utilizados pelas propriedades; β^M são os parâmetros estruturais a serem estimados da metafronteira; v_{ij}^M é o termo de erro independente e identicamente distribuído; e u_{ij}^M é o termo

de erro não negativo que representa o gap tecnológico da propriedade i . Este último expressa a relação entre o produto potencial (máximo) da propriedade i diante da tecnologia de produção j (tecnologia que ela adota) e o produto máximo de metafronteira (com o uso da melhor tecnologia disponível no setor).

O gap tecnológico da propriedade i (TGR_i) pode ser calculado como a razão entre a produção de fronteira do grupo j , $f_{ij}^*(x_{ij})$, e a produção máxima de metafronteira, f_i^M :

$$TGR_i = \frac{f_{ij}^*(x_{ij})}{f_i^M} \quad (7)$$

O TGR_i é um indicador que também varia entre 0 e 1. Esse índice é uma medida da diferença de produtividade entre a tecnologia adotada pela empresa i e a melhor tecnologia disponível na indústria. A comparação dos TGRs médios de adotantes e não adotantes pode revelar a distância média entre as fronteiras de produção, o que é uma medida de choque tecnológico puro.

Por fim, o índice de TE da propriedade i também pode ser calculado em relação à metafronteira de produção:

$$TE_{iM} = TE_{ij} \times TGR_i \quad (8)$$

em que TE_{iM} é o produto entre o índice de TE da propriedade i no grupo j (TE_{ij}) e o gap tecnológico da propriedade i (TGR_i). TE_{iM} mostra os desvios na produção observada da propriedade i em relação à produção máxima que poderia ser produzida com o mesmo pacote de insumos que utiliza, porém, adotando a melhor tecnologia em uso no setor. Os índices de TE_{iM} de adotantes e não adotantes podem ser comparados porque são estimados em relação à mesma função metafronteira.

2.3 Variáveis

A Tabela 1 apresenta a definição das variáveis utilizadas no modelo econométrico, enquanto a Tabela 2 reporta as estatísticas descritivas para a amostra total ($n=152$) e para os grupos de adotantes ($n=48$) e não adotantes ($n=104$) do sistema de Integração Lavoura–Pecuária.

Tabela 1: Descrição das variáveis

Variável	Descrição
<i>Output</i> (<i>y</i>)	Produção de soja em 2023/24 (toneladas)
<i>Área</i> (<i>x1</i>)	Área plantada com soja em 2023/24 (hectares)
<i>Labor</i> (<i>x2</i>)	Horas de trabalho (permanentes e temporárias) em 2023/24
<i>Machinery</i> (<i>x3</i>)	Número de tratores e máquinas autopropelidas em 2023/24
<i>Inputs</i> (<i>x4</i>)	Custos de insumos intermediários (sementes, fertilizantes, agroquímicos) em 2023/24 (em Reais)
<i>Precipitation</i> (<i>x5</i>)	Precipitação diária acumulada na safra principal de soja (set-fev) em 2023/24 (mm)
<i>Irrigation</i> (<i>x6</i>)	Variável dummy para controle de irrigação: 1 se o produtor possui sistema de irrigação, 0 caso contrário

Tabela 2: Estatística descritiva das variáveis

	Amostra agrupada (n=152)		Adotantes (n=48)		Não adotantes (n=104)	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
<i>Output</i>	1349,29	2444,7	761,62	1240,57	1620,53	2797,19
<i>Areasoytot</i>	446,80	650,63	325,45	458,28	502,81	717,44
<i>Labor</i>	7190,06	12336,35	5423,33	6912,27	8005,47	14113,07
<i>Machinery</i>	3,68	2,12	3,21	1,43	3,89	2,35
<i>Inputs</i>	1656938,5	2443247,35	1434386	2187755,12	1759655,05	2556087,16
<i>Precipitation</i>	805,31	69,59	775,48	59,08	819,08	70,01
<i>Irrigation</i>	54	35,5	11	22,9	43	41,3

A variável dependente da fronteira estocástica é *Output*, definida como a produção total de soja, em toneladas, na safra 2023/2024. A escolha da produção física, em vez de indicadores monetários, evita distorções associadas a variações de preços e possível comparação direta do desempenho técnico entre propriedades.

O vetor de insumos contempla os fatores tradicionais de produção: terra, trabalho, capital e insumos intermediários, além de variáveis que controlam para condições tecnológicas e ambientais. O fator terra é representado pela variável *Área*, correspondente à área plantada com soja, em hectares. Trata-se do principal insumo físico na atividade e sua inclusão permite avaliar retornos de escala e elasticidade da produção em relação à expansão da base produtiva.

O fator trabalho é mensurado pela variável *Labor*, definida como o total de horas trabalhadas, mão de obra permanente e temporária, ao longo da safra. Essa variável capta o esforço produtivo diretamente empregado na condução da lavoura, incluindo operações de plantio, tratos culturais e colheita.

O fator capital físico é representado pela variável *Machinery*, medida pelo número de tratores e máquinas autopropelidas disponíveis na propriedade. Essa proxy captura o grau de

mecanização e a capacidade operacional do produtor, que influenciam diretamente a eficiência na execução das atividades agrícolas.

Os insumos intermediários são agregados na variável *Inputs*, correspondente às despesas com sementes, fertilizantes e agroquímicos na safra 2023/2024 (em Reais). Essa variável representa o componente variável do custo de produção e está diretamente associada à intensidade tecnológica empregada na lavoura.

Além dos fatores convencionais, a especificação incorpora variáveis que controlam condições exógenas e diferenciais tecnológicos. A variável *Irrigation* controla diferenças estruturais no manejo hídrico, permitindo isolar o efeito da disponibilidade artificial de água sobre a produção de soja das propriedades. A variável *Precipitation* corresponde à precipitação acumulada durante a safra, em milímetros, e capta choques climáticos que afetam diretamente o rendimento da cultura, sendo tratada como variável exógena ao processo decisório do produtor.

3. Resultados

As fronteiras de produção foram estimadas separadamente para produtores adotantes e não adotantes do ILP (Tabela 3), utilizando-se a forma funcional Cobb–Douglas com correção de seletividade amostral conforme Greene (2010). Embora especificações Translog também tenham sido estimadas, os resultados da forma funcional Cobb–Douglas se mostraram melhores, especialmente devido ao tamanho amostral relativamente reduzido. Diante disso, optou-se pela especificação Cobb–Douglas, amplamente utilizada na literatura e mais adequada ao contexto empírico do estudo.

Tabela 3: Fronteiras estocásticas de produção com correção de seleção amostral

Variável	Adotantes (ILP)		Não adotantes	
	Coeficiente	Erro-Padrão	Coeficiente	Erro-Padrão
Intercepto	0.10897	0.38814	0.19984*	0.08820
$\ln(\text{Areasoytot})$	0.87281***	0.12005	0.94001***	0.05851
$\ln(\text{Labor})$	0.14556	0.19217	0.17487	0.11663
$\ln(\text{Machinery})$	0.16350	0.18597	0.04164	0.10294
$\ln(\text{Inputs})$	-0.02235	0.06411	0.01567	0.03773
$\ln(\text{Precipitation})$	3.54546***	0.91402	1.89056***	0.51762
<i>Irrigation</i>	0.14272	0.19256	0.25539**	0.08996
Parâmetros de variância				
$\sigma^2(u)$	0.17068		0.33721	
$\sigma^2(v)$	0.07725		0.05142	
Gamma (γ)	0.68843		0.86770	
Lambda (λ)	1.48646		2.56092	
Eficiência técnica média	0.74162		0.68193	
Log-verossimilhança	-67.062		-96.992	
Observações	48		104	
Parâmetro de seletividade				
ρ (rho)	-0.41546		-0,73330*	

Notas: ***, **, * indicam significância estatística a 1%, 5% e 10%, respectivamente

Os resultados indicam que a elasticidade parcial da produção em relação à área é estatisticamente significativa em ambos os grupos tecnológicos (adotantes e não adotantes de ILP), ou seja, o incremento na produção de soja depende da disponibilidade de área adicional. Na fronteira dos não adotantes, a elasticidade estimada é de 0.94 – i.e., o aumento de 1% na área aumenta a produção de soja em 0.94%, *ceteris paribus*. Entre os adotantes do ILP, a elasticidade é de 0.87.

As elasticidades parciais do capital físico, mão de obra e insumos intermediários não apresentaram significância estatística em nenhum dos grupos amostrais. Ainda assim, os coeficientes exibiram sinais e magnitudes coerentes com a teoria microeconômica, com exceção dos insumos intermediários entre os adotantes de ILP, o que sugere que o modelo está bem especificado. A elasticidade de escala foi estimada em 1,16 para adotantes e 1,17 para não adotantes. Contudo, os testes estatísticos não rejeitam a hipótese de retornos constantes à escala ($p > 0,10$) em ambos os regimes, indicando que aumentos proporcionais nos insumos resultam, em média, em aumentos proporcionais da produção.

A variável *precipitation* apresentou efeito positivo e significativo em ambos os grupos, com magnitude superior na fronteira dos adotantes (3.54) em comparação aos não adotantes (1.89). Os resultados sugerem que, ainda que os adotantes de sistemas ILP tenham sido mais

afetados pelo déficit hídrico na safra 2023/2024 (Tabela 3), conseguiram produzir mais (maior TE), mesmo com tecnologia menos produtiva que os não-adotantes (menor TGR), conforme Tabela 5. Já a variável *irrigation* foi estatisticamente significativa apenas na fronteira de produção dos não adotantes. Neste caso, o uso de irrigação tem um efeito de 25,5% na produção de soja, *ceteris paribus*.

No que se refere aos parâmetros de variância, o coeficiente γ foi elevado em ambos os grupos (0,69 para adotantes e 0,87 para não adotantes), indicando que a maior parte da variabilidade do erro está associada à ineficiência técnica, especialmente entre os não adotantes. O parâmetro de seletividade (ρ) não foi estatisticamente significativo para os adotantes, mas foi negativo e significativo para os não adotantes ($p < 0,05$), evidenciando a presença de viés de seleção amostral neste grupo e justificando a utilização do modelo com correção de seletividade.

A eficiência técnica (TE) média estimada pelo método de Battese e Coelli (1992) foi de 0.7416 para adotantes e 0.6819 para não adotantes (Tabela 5). O teste t de Welch rejeita a hipótese de igualdade de médias ($p = 0.0126$). Assim, produtores adotantes de ILP demonstram maior capacidade de converter insumos em produto dentro de sua tecnologia específica, sugerindo maior eficiência técnica média entre os adotantes de ILP em comparação aos não adotantes. Além disso, a dispersão da eficiência é menor entre os adotantes ($CV = 0,16$) do que entre os não adotantes ($CV = 0,24$), e o teste de igualdade de variâncias rejeita a hipótese de homocedasticidade ($p < 0,05$), sugerindo maior homogeneidade no desempenho dos produtores que adotam ILP.

Apesar dessas diferenças, a comparação direta entre eficiências pode ser limitada pelo fato de que os grupos operam sob diferentes conjuntos tecnológicos. Para contornar essa limitação, estimou-se uma metafronteira estocástica conforme Huang et al. (2014) (Eq. 6), permitindo decompor a eficiência global em eficiência técnica relativa à fronteira do grupo e gap tecnológico.

Foram estimadas duas especificações: homocedástica e heterocedástica (com variância da ineficiência em função da irrigação). A especificação heterocedástica apresentou melhor ajuste, com aumento do log-verossimilhança (de 16,62 para 37,16), redução do AIC (de -17,2 para -56,3) e teste de razão de verossimilhança significativo ($LR = 41,08$), indicando a presença de ineficiência técnica na metafronteira. Assim, a Tabela 4 apresenta os resultados dessa especificação.

Tabela 4: Metafronteira estocástica com heterocedasticidade da ineficiência

Variável	Coeficiente	Erro-Padrão
Intercepto	7.48063***	0.02269
$\ln(\text{Areasoytot})$	0.93065***	0.02205
$\ln(\text{Labor})$	0.13976***	0.03974
$\ln(\text{Machinery})$	0.07843**	0.02821
$\ln(\text{Inputs})$	0.00617	0.01274
$\ln(\text{Precipitation})$	2.56828 ***	0.19458
Parâmetros de variância		
$\sigma^2(u)$	0.02448	
$\sigma^2(v)$	0.04559	
Gamma (γ)	0.65059	
Lambda (λ)	1.36453	
Eficiência média da metafronteira	0.85009	

Notas: ***, **, * indicam significância estatística a 1%, 5% e 10%, respectivamente

Os coeficientes estimados na metafronteira indicam que a elasticidade da área permanece próxima à proporcionalidade unitária (0,93), evidenciando a importância da escala produtiva mesmo no envelope tecnológico máximo. Diferentemente das fronteiras específicas, a variável associada à mecanização torna-se estatisticamente significativa, sugerindo que, no nível tecnológico mais avançado, o uso de máquinas contribui para elevar a produção potencial.

A Tabela 5 apresenta as médias da eficiência técnica (TE), do gap tecnológico (TGR) e da eficiência técnica global por grupo (TE_m).

Tabela 5: Eficiência técnica (TE), gap tecnológico (TGR) e Eficiência técnica global (TE_m)

Indicador	Não adotantes	Adotantes	Diferença (p-valor)
Eficiência técnica (TE)	0,6819	0,7416	0,0126**
Gap tecnológico (TGR)	0.9033	0.8275	0,0004***
Eficiência técnica global (TE _m)	0,6230	0,6212	0,9511

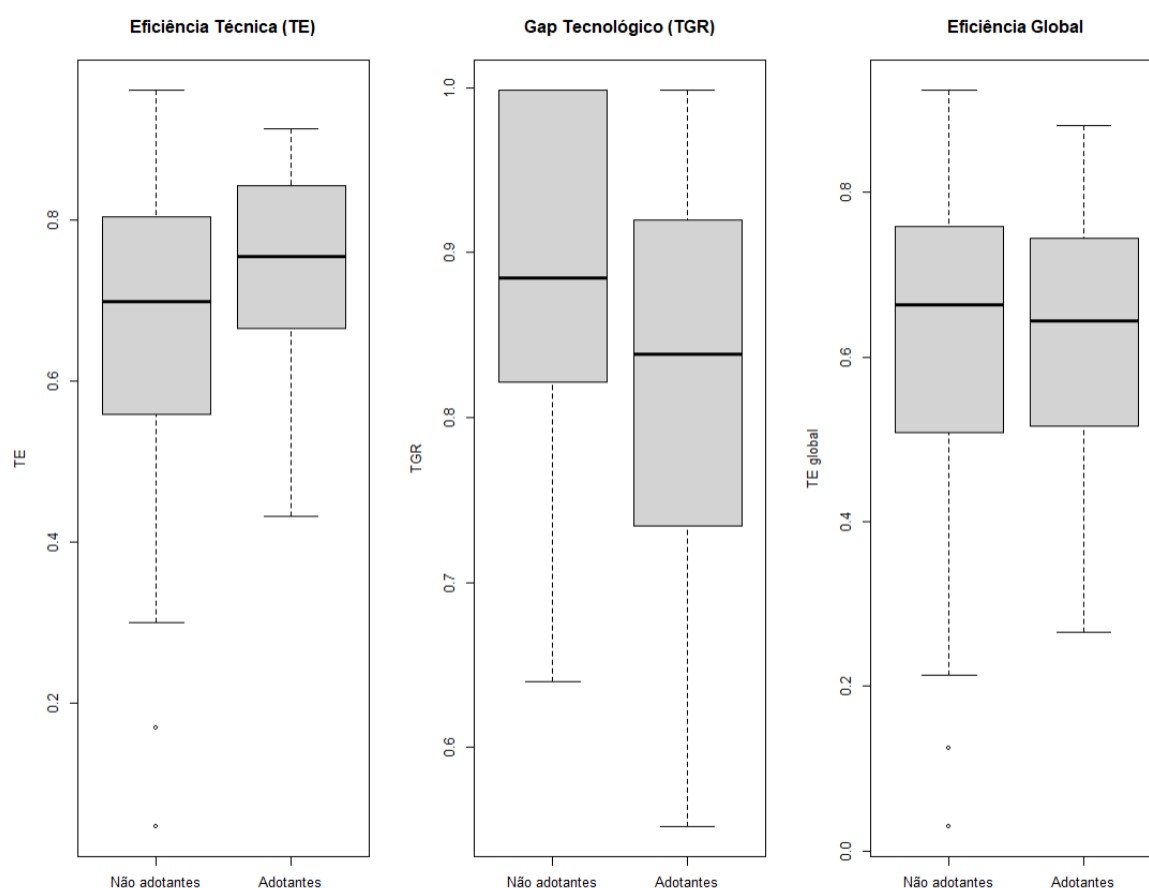
Nota: TE refere-se à eficiência técnica relativa à fronteira do grupo específico; TGR ao *technology gap ratio*; e TE_m à eficiência técnica global em relação à metafronteira.

Os resultados indicam que o TGR médio é estatisticamente maior para os não adotantes (0,903) do que para os adotantes (0,827), com diferença significativa ($p < 0,01$). Isso implica que, em média, a tecnologia utilizada pelos não adotantes encontra-se mais próxima da fronteira tecnológica comum. Entretanto, quando se considera a eficiência técnica global, definida como o produto entre a eficiência técnica relativa à fronteira do grupo específico e o *Technology Gap Ratio*, não se observam diferenças estatisticamente significativas entre adotantes e não

adotantes ($p = 0,951$). As médias são semelhantes (0,621 para adotantes e 0,623 para não adotantes). Esse resultado sugere um trade-off entre eficiência técnica e gap tecnológico, no qual ganhos de eficiência relativa no grupo específico de adotantes de ILP são compensados por maior distância em relação à fronteira tecnológica comum (metafronteira), resultando em desempenho global semelhante entre os grupos.

A análise gráfica apresentada na Figura 2 corrobora esses achados, evidenciando maior eficiência média e menor dispersão entre os adotantes, maior proximidade da metafronteira entre os não adotantes e ausência de diferenças relevantes na eficiência técnica global.

Figura 2: Distribuição da eficiência técnica (TE), do *Technology Gap Ratio* (TGR) e da eficiência técnica global por grupo (adotantes e não adotantes de ILP)



Nota: Os boxplots apresentam mediana, quartis e valores extremos. TE refere-se à eficiência relativa à fronteira do grupo específico; TGR mede a distância em relação à metafronteira; e a eficiência técnica global corresponde ao produto entre TE e TGR.

4. Considerações finais

Este estudo investigou os efeitos da adoção da Integração Lavoura–Pecuária (ILP) sobre a eficiência técnica de produtores de soja no estado de São Paulo, considerando a natureza não aleatória da decisão tecnológica e as diferenças estruturais entre os grupos. Para tanto, foram estimadas fronteiras estocásticas com correção de seletividade amostral, bem como uma metafronteira, permitindo avaliar tanto a eficiência técnica relativa nos grupos específicos (adotante de ILP e não adotante) quanto o gap tecnológico e a eficiência técnica global.

Os resultados indicam que os produtores adotantes de ILP apresentam maior eficiência técnica média em relação aos não adotantes, sugerindo maior capacidade de conversão de insumos em produto dentro de seus respectivos conjuntos tecnológicos. Além disso, observa-se menor dispersão da eficiência entre os adotantes, indicando maior homogeneidade no desempenho produtivo desse grupo. Entretanto, a análise da metafronteira revela que os não-adotantes apresentam maior proximidade em relação à fronteira tecnológica comum, conforme evidenciado pelo maior valor médio do *Technology Gap Ratio* (TGR). Esses resultados sugerem que, apesar de os produtores de sistemas ILP terem sofrido mais com o déficit hídrico na safra 2023/2024, eles foram mais eficientes na gestão dos recursos disponíveis (maior TE), mesmo operando com uma tecnologia de menor potencial produtivo (menor TGR) que os não-adotantes.

Quando considerada a eficiência técnica global, que combina eficiência técnica e gap tecnológico, não se observa diferença estatisticamente significativa entre os grupos. Esse achado sugere a existência de um trade-off: os ganhos de eficiência técnica associados ao ILP são compensados por um maior distanciamento em relação à metafronteira, resultando em desempenho global semelhante entre adotantes e não adotantes.

Do ponto de vista econômico, esses resultados indicam que a adoção do ILP não implica, necessariamente, ganhos imediatos em termos de eficiência produtiva global, mas está associada a melhor gestão na utilização dos recursos. Esse padrão pode refletir a complementaridade entre os componentes do sistema integrado.

Do ponto de vista de política pública, os resultados sugerem que estratégias de promoção do ILP devem ir além do incentivo à adoção, contemplando também ações voltadas à difusão de conhecimento técnico, capacitação gerencial e redução das barreiras associadas à implementação e consolidação do sistema. Tais medidas podem contribuir para potencializar os ganhos de eficiência no longo prazo.

Este estudo contribui ao fornecer evidências empíricas sobre a relação entre adoção de sistemas integrados e eficiência técnica no contexto brasileiro, destacando a importância de considerar simultaneamente eficiência relativa e posicionamento tecnológico. Ao integrar métodos de correção de seletividade e análise de metafronteira, o trabalho avança na compreensão dos efeitos econômicos da adoção do ILP. Vale ressaltar que a análise referiu-se ao efeito da adoção de ILP na produção de soja do estado de São Paulo. Sugerem-se estudos adicionais para investigar a associação da adoção de ILP e a eficiência técnica da produção pecuária.

Como limitação, destaca-se o caráter transversal dos dados, que impede a análise dinâmica dos ganhos de eficiência ao longo do tempo. Pesquisas futuras podem explorar dados em painel e investigar a evolução da eficiência técnica e do gap tecnológico à medida que os produtores avançam no processo de adoção e aprendizado, bem como considerar a intensidade de uso do sistema ILP e sua interação com outras tecnologias produtivas. Ao integrar métodos de correção de seletividade e análise de metafronteira em dados primários recentes, o estudo reforça a importância de abordagens que considerem simultaneamente eficiência e heterogeneidade tecnológica na avaliação de sistemas produtivos agrícolas.

5. Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), à qual os autores estão vinculados, à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio e financiamento durante o desenvolvimento da pesquisa (Processos FAPESP nº 2022/02967-5 e nº2024/13708-6, Processo CNPq nº 404187/2023-4).

Referências

ALARY, V. *et al.* Multi-criteria assessment of the sustainability of farming systems in the reclaimed desert lands of Egypt. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 183, 102863, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102863>.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Reference document crop-livestock-forestry integration**. Brasília, DF: Embrapa, 2011.

BATTESE, G. E.; COELLI, T. J. Frontier production functions, technical efficiency and panel data: with application to paddy farmers in India. **Journal of Productivity Analysis**, [s. l.], v. 3, n. 1, p. 153-169, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00158774>.

BRAVO-URETA, B. E.; GREENE, W.; SOLÍS, D. Technical efficiency analysis correcting for biases from observed and unobserved variables: an application to a natural resource management project. **Empirical Economics**, [s. l.], v. 43, p. 55–72, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00181-011-0491-y>.

BRAVO-URETA, B. E.; HIGGINS, D.; ARSLAN, A. Irrigation infrastructure and farm productivity in the Philippines: a stochastic Meta-Frontier analysis. **World Development**, [s. l.], v. 135, 105073, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105073>.

CARAUTA, M. *et al.* Climate-related land use policies in Brazil: how much has been achieved with economic incentives in agriculture?. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 109, 105618, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105618>.

CARMONA, F. D. C. *et al.* Effectiveness of current fertilizer recommendations for irrigated rice in integrated crop-livestock systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 40, e0140798, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20140798>.

CARRER, M. J. *et al.* Precision agriculture adoption and technical efficiency: an analysis of sugarcane farms in Brazil. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 177, 121510, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121510>.

CARRER, M. J.; MAIA, A. G.; VINHOLIS, M. M. B. *et al.* Assessing the effectiveness of rural credit policy on the adoption of integrated crop-livestock systems in Brazil. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 92, 104468, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.10446>.

DHEHIBI, B. *et al.* Assessing complementary synergies for integrated crop–livestock systems under conservation agriculture in Tunisian dryland farming systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, [s. l.], v. 6, 1022213, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1022213>.

DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ, A. *et al.* Impact of the integration level in crop–livestock systems on biomass production, nutrient recycling, and energy efficiency. **Biomass**, [s. l.], v. 5, n. 2, 19, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/biomass5020019>.

GREENE, W. A stochastic frontier model with correction for sample selection. **Journal of Productivity Analysis**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 15–24, 2010.

HUANG, C. J.; HUANG, T. H.; LIU, N. H. A new approach to estimating the metafrontier production function based on a stochastic frontier framework. **Journal of Productivity Analysis**, [s. l.], v. 42, p. 241–254, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11123-014-0402-2>.

ISRAEL, G. D. **Determining sample size**. Gainesville: University of Florida, IFAS Extension, 1992. (Agricultural Education and Communication Department, PEOD6).

MOZZER, G. B. Agriculture and cattle raising in the context of a low carbon economy. *In: Climate Change in Brazil*, [s. l.], p. 107, 2011.

O'DONNELL, C. J.; RAO, D. P.; BATTESE, G. E. Metafrontier frameworks for the study of firm-level efficiencies and technology ratios. **Empirical Economics**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 231–255, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00181-007-0119-4>.

OLIVEIRA, J. M. *et al.* Predicting soil organic carbon dynamics of integrated crop-livestock system in Brazil using the CQESTR model. **Frontiers in Environmental Science**, [s. l.], v. 10, 826786, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.826786>.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. **Levantamento censitário das unidades de produção agropecuária do Estado de São Paulo (LUPA) 2016/2017**: dados consolidados. São Paulo: CATI, 2017. Disponível em: <https://www.cati.sp.gov.br/projetolupa/>. Acesso em: 5 abr. 2026.

SOARES, M. B. *et al.* Integrated production systems: an alternative to soil chemical quality restoration in the Cerrado-Amazon ecotone. **Catena**, [s. l.], v. 185, 104279, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104279>.

VILLANO, R. *et al.* Modern rice technologies and productivity in the Philippines: disentangling technology from managerial gaps. **Journal of Agricultural Economics**, [s. l.], v. 66, n. 1, p. 129-154, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12081>.

VILLANO, R.; ASANTE, B. O.; BRAVO-URETA, B. Farming systems and productivity gaps: opportunities for improving smallholder performance in the Forest-Savannah transition zone of Ghana. **Land Use Policy**, [s. l.], v. 82, p. 220–227, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.010>.

VINHOLIS, M. M. B.; SAES, M. S. M.; CARRER, M. J. *et al.* The effect of meso-institutions on adoption of sustainable agricultural technology: a case study of the Brazilian Low Carbon Agriculture Plan. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 280, 124334, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124334>.

YANG, G. *et al.* Research trends in crop–livestock systems: a bibliometric review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, [s. l.], v. 19, n. 14, 8563, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph19148563>.