

WORKING PAPER PSPHUB

Análise econométrica e multimodal do escoamento da soja no Rio Grande Do Sul

Mario Antonio Margarido

21 de outubro de 2026

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. OBJETIVO	5
3. DADOS	5
4. MÉTODO.....	6
4.1 Concentração da Oferta e Potencial Produtivo	9
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
6. LITERATURA CITADA	21

ANÁLISE ECONOMETRICA E MULTIMODAL DO ESCOAMENTO DA SOJA NO RIO GRANDE DO SUL: UMA ABORDAGEM VIA MODELO GRAVITACIONAL PPML

Mario Antonio Margarido¹

RESUMO: Este trabalho analisa os determinantes econométricos e espaciais do escoamento da soja dos principais municípios produtores do Rio Grande do Sul em direção aos seus dois principais polos portuários de exportação: o Porto de Rio Grande (marítimo/deep-sea) e o Porto de Porto Alegre (fluvial/transbordo). Com base em dados do período de 2011 a 2024, aplicou-se um Modelo Gravitacional estimado via Pseudo-Poisson de Máxima Verossimilhança (PPML), incorporando efeitos de distância geodésica, massa de produção agrícola, infraestrutura multimodal (ferroviária e hidroviária) e limitações operacionais de calado. Os resultados apontam que a distância física atua como um forte atrito logístico (elasticidade de -1,43), enquanto o volume produzido exerce uma atração quase proporcional (elasticidade de +0,91). Embora Porto Alegre apresente maior proximidade geográfica em 100% da amostra, sua atratividade intrínseca é penalizada em 49,5% devido às restrições de calado e custos de duplo manuseio (transbordo). Por outro lado, a presença de conexões multimodais eleva a eficiência do escoamento em 42,1%, mitigando o frete rodoviário de longa distância rumo ao Porto de Rio Grande. Conclui-se que os portos possuem funções complementares e que o fortalecimento da infraestrutura intermodal é indispensável para elevar a competitividade do agronegócio gaúcho.

Palavras-Chave: Logística Agrícola; Soja; Modelo Gravitacional; PPML; Rio Grande do Sul; Multimodalidade.

ECONOMETRIC AND MULTIMODAL ANALYSIS OF SOYBEAN TRANSPORTATION IN RIO GRANDE DO SUL: A PPML GRAVITY MODEL APPROACH

ABSTRACT: This study analyzes the econometric and spatial determinants of soybean transportation flows from the main producing municipalities in Rio Grande do Sul to its two primary export port hubs: the Port of Rio Grande (deep-sea maritime) and the Port of Porto Alegre (fluvial/transshipment). Based on panel data covering the period from 2011 to 2024, a Gravity Model was estimated using the Poisson Pseudo-Maximum Likelihood (PPML) technique, incorporating geodesic distance effects, agricultural production mass, multimodal infrastructure (rail and waterway), and operational draft constraints. The results indicate that physical distance acts as a strong logistical friction (distance elasticity of -1.43), whereas the

¹ Doutor em Economia Aplicada pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Esalq/USP), Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics e Pesquisador do PSP Hub Estudos em Infraestrutura e Urbanismo. mario.margarido@pezco.com.br.

produced volume exerts an almost proportional attraction (production mass elasticity of +0.91). Although Porto Alegre exhibits greater geographic proximity across 100% of the sample, its intrinsic attractiveness is penalized by 49.5% due to draft restrictions and double-handling transshipment costs. Conversely, the presence of multimodal connections increases transportation efficiency by 42.1%, mitigating long-distance road freight toward the Port of Rio Grande. The study concludes that the two ports perform complementary roles within the supply chain, and strengthening intermodal infrastructure is crucial to enhancing the competitiveness of Rio Grande do Sul's agribusiness sector.

Keywords: Agricultural Logistics; Soybean; Gravity Model; PPML; Rio Grande do Sul; Multimodality.

1. INTRODUÇÃO

A cultura da soja consolida-se como um dos pilares mais expressivos do agronegócio brasileiro, figurando como um vetor estratégico para o Produto Interno Bruto (PIB) e para o saldo da balança comercial do país. No estado do Rio Grande do Sul, a sojicultura desempenha um papel socioeconômico central, estendendo sua presença em diversas regiões produtoras e dinamizando desde a economia de pequenos municípios agrícolas até o complexo agroindustrial (Embrapa, 2024; Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2023). O estado posiciona-se historicamente entre os maiores produtores nacionais da oleaginosa, cuja safra é fundamental para o abastecimento do mercado interno e para o atendimento da demanda global por proteínas de origem vegetal (Conab, 2023).

Entretanto, a eficiência e a competitividade do setor dependem não apenas do ganho de produtividade no campo, mas também da capacidade de escoamento e da infraestrutura logística do estado (Pires *et al.*, 2021). O transporte da safra gaúcha é marcado pelo predomínio do modal rodoviário, que conecta as propriedades rurais aos centros de processamento e, prioritariamente, ao Porto do Rio Grande, o principal corredor de exportação marítima do estado (Mello e Ramos, 2020). Desafios relacionados às condições das rodovias, gargalos de armazenagem nos períodos de pico da colheita e a vulnerabilidade do sistema logístico frente a eventos climáticos extremos evidenciam a necessidade contínua de investimentos em logística multimodal (Fagundes, 2022). Diante disso, compreender a dinâmica que envolve a produção da soja e a eficiência do seu escoamento no Rio Grande do Sul é indispensável para propor estratégias que garantam a sustentabilidade econômica e logística do agronegócio regional.

2. OBJETIVO

Analisar econometricamente os fatores determinantes do fluxo de escoamento da soja das principais regiões produtoras do Rio Grande do Sul até os portos de Rio Grande e Porto Alegre no período de 2011 a 2024, utilizando uma especificação de Modelo Gravitacional com o estimador de Pseudo-Poisson por Máxima Verossimilhança (PPML) para mensurar o impacto da distância geográfica, da massa de produção, das restrições de calado e da disponibilidade de infraestrutura intermodal (ferroviária e hidroviária) na competitividade do transporte da safra gaúcha.

3. DADOS

O período analisado se inicia em 2011 e estende-se até 2024, compreendendo 14 anos.

A extração da malha espacial e dos centróides dos municípios gaúchos foi realizada por meio do pacote *geobr* (Pereira *et al.*, 2021), com base nos limites territoriais oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020).

Os volumes de produção agrícola foram estruturados considerando os dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2024) e do acompanhamento das safras de grãos da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024).

A estimação da equação gravitacional foi conduzida via estimador de Pseudo-Poisson de Máxima Verossimilhança (PPML), utilizando o pacote *fixest* (Bergé, 2018).

O modelo gravitacional de transporte e logística utiliza variáveis dependentes, explicativas (independentes), *dummies* de infraestrutura modal e efeitos fixos, sendo que, as variáveis utilizadas constam no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição das Variáveis Utilizadas no Modelo PPML

Nome da Variável no Script	Descrição / Função Econométrica	Unidade / Tipo	Fonte da Variável
<i>Fluxo_Escoamento</i>	Volume estimado de escoamento da soja da origem (município) ao destino (porto)	Toneladas / Valor Sintético	Calculada via modelo gravítico sintético
<i>Producao_Soja_Ton (Log_Producao)</i>	Massa/massa crítica da oferta de soja nos polos produtores (massa da origem)	Toneladas	Simulação com parâmetros históricos da IBGE/PAM e CONAB

<i>Distancia_km</i> (<i>Log_Distancia</i>)	Distância geodésica entre o centróide do município polo e o terminal portuário	Quilômetros (km)	Calculada via pacote <i>sf</i> com malha do <i>geobr</i> (IBGE)
<i>Tem_Ferrovia</i>	Indicadora da presença de infraestrutura ferroviária no município polo (1 = Sim, 0 = Não)	Binária (0 ou 1)	Mapeamento de malha de transportes
<i>Tem_Hidrovia</i>	Indicadora de acesso/conexão hidroviária (1 = Sim, 0 = Não)	Binária (0 ou 1)	Mapeamento de malha de transportes
<i>Interacao_Dist_Hidrovia</i>	Termo de interação entre a distância logaritmizada e o acesso à hidrovia (<i>Log_Distancia</i> * <i>Tem_Hidrovia</i>)	Numérica contínua	Variável gerada no <i>script</i>
<i>f_muni, f_porto, f_ano</i>	Efeitos fixos de município (origem), porto (destino) e ano (tempo) para controle de heterogeneidade não observada	Categórica (Fator)	Estrutura de painel diádico

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2020 e 2024) E CONAB (2024).

4. MÉTODO

O Modelo Gravitacional tradicional proposto por Tinbergen (1962) e fundamentado teoricamente por Anderson e van Wincoop (2003) postula que os fluxos bilaterais entre duas regiões (ou origens e destinos) dependem diretamente da dimensão econômica das regiões e inversamente do custo de transporte/distância entre elas:

$$Y_{ij} = \beta_0 \cdot \frac{X_i^{\beta_1} \cdot X_j^{\beta_2}}{D_{ij}^{\beta_3}}$$

em que:

- Y_{ij} : Fluxo de transporte/comércio da origem i para o destino j .
- X_i, X_j : Massa econômica da origem (ex.: produção de soja) e do destino (ex.: capacidade do porto).

- D_{ij} : Distância ou custo de transporte entre i e j .

A abordagem clássica aplicava o logaritmo natural em ambos os lados para estimar a equação por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO):

$$\ln(Y_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(X_i) + \beta_2 \ln(X_j) - \beta_3 \ln(D_{ij}) + \varepsilon_{ij}$$

É necessário destacar que aplicação de regressão linear sobre variáveis logaritmizadas induz a viés sistemático sob heterocedasticidade, problema contornado pelo uso do estimador de Pseudo-Poisson por Máxima Verossimilhança (PPML) introduzido por Santos Silva e Tenreyro (2006).

Santos Silva e Tenreyro (2006) demonstraram duas limitações graves nessa especificação:

1. Tratamento dos Fluxos Nulos (Zeros): Como $\ln(0)$ é indefinido, observações sem fluxo real de transporte são eliminadas da amostra, gerando viés de seleção;
2. Heterocedasticidade: Sob heterocedasticidade nos termos de erro da equação em nível, os termos de erro logaritmizados dependem dos regressores ($E[\ln(\varepsilon) | X] \neq 0$), violando a hipótese central do MQO e gerando estimadores inconsistentes e viesados.

Para superar tais limitações, Santos Silva e Tenreyro (2006) propuseram a estimação direta da equação em nível multiplicativo por meio do estimador de Pseudo-Poisson por Máxima Verossimilhança (*Poisson Pseudo-Maximum Likelihood* - PPML):

$$E[Y_{ij}|X] = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln(X_i) + \beta_2 \ln(X_j) + \beta_3 \ln(D_{ij}) + \gamma Z_{ij})$$

onde:

$E[Y_{ij}|X]$: Valor esperado da variável dependente Y_{ij} (ex.: fluxo de comércio ou transporte da origem i para o destino j) condicional às variáveis explicativas X ;

β_0 : Intercepto do modelo;

$\beta_1 \ln(X_i)$: Massa/tamanho da origem i (ex.: PIB da origem);

$\beta_2 \ln(X_j)$: Massa/tamanho do destino j (ex.: PIB do destino);

$\beta_3 \ln(D_{ij})$: Logaritmo da distância geográfica entre i e j ;

γZ_{ij} : Vetor de variáveis de controle adicionais e seus coeficientes estimados.

Em relação ao último elemento à direita dentro da função exponencial, γZ_{ij} , representa um vetor (ou combinação linear) de variáveis de controle adicionais e seus respectivos parâmetros. Mais especificamente, Z_{ij} é um vetor de variáveis explicativas ou de controle adicionais específicas para o par origem-destino (i, j) . Em modelos de gravidade do comércio ou transporte, costuma incluir variáveis *dummy* ou contínuas que afetam os fluxos (por exemplo: compartilhar a mesma fronteira terrestre, compartilhar o mesmo idioma, acordos comerciais preferenciais, presença de determinado modal de transporte, efeitos fixos de origem/destino ou de tempo etc.). Enquanto, o parâmetro γ é o vetor de parâmetros (coeficientes) a serem estimados associados a essas variáveis adicionais Z_{ij} .

As principais vantagens da utilização do estimador PPML são:

- Consistência sob Heterocedasticidade: Garante estimadores não-viesados e consistentes, mesmo na presença de variância não constante dos erros.
- Inclusão de Valores Zeros: Não exige transformações logarítmicas na variável dependente (Y_{ij}), permitindo a inclusão natural de pares origem-destino sem fluxo logístico.
- Compatibilidade com Efeitos Fixos Mutidimensionais: Permite a incorporação eficiente de efeitos fixos de origem (α_i), destino (δ_j) e tempo (τ_t) via algoritmos modernos de convergência (como o pacote *fixest* em R) para controlar a resistência multilateral não observada (Anderson & van Wincoop, 2003; Bergé, 2018).

A inclusão de múltiplos níveis de efeitos fixos para capturar a heterogeneidade e a resistência multilateral é recomendada pela literatura de comércio internacional (Fally, 2015; Santos Silva e Tenreyro, 2010), podendo ser estimada com alta eficiência computacional (Bergé, 2018).

Análise Integrada: Dinâmica Produtiva e Desafios Logísticos da Soja no Rio Grande do Sul

A análise conjunta dos dados de produção agrícola e das matrizes de distância revela os principais gargalos e potencialidades da cadeia da soja no estado do Rio Grande do Sul. A eficiência do agronegócio gaúcho depende diretamente da articulação entre a alta concentração de oferta nas regiões produtoras e a distância até os principais terminais de escoamento marítimo (Porto de Rio Grande e Porto de Porto Alegre).

4.1 Concentração da Oferta e Potencial Produtivo

O conjunto de dados da Produção Agrícola Municipal (PAM/IBGE) referente à cultura da soja em grão no Rio Grande do Sul revela a relevância estrutural do estado no cenário da orizicultura e da modernização do agronegócio nacional. Na amostra analisada, composta por 24 municípios representativos das principais regiões produtoras gaúchas, a área total cultivada atinge cerca de 2,63 milhões de hectares, responsáveis por uma produção agregada de aproximadamente 6,70 milhões de toneladas do grão em 2024. A produtividade média ponderada do grupo situa-se em 2,55 toneladas por hectare (t/ha), com uma média aritmética municipal de 2,59 t/ha e mediana de 2,65 t/ha, refletindo a heterogeneidade espacial e climática que caracteriza o desempenho das lavouras no território sul-rio-grandense (Tabela 1).

O volume total de produção é fortemente impulsionado por polos agrícolas de grande escala territorial situados na Região Central e na Fronteira Oeste. O município de Cruz Alta destaca-se como o maior produtor absoluto da amostra, alcançando 410,4 mil toneladas a partir de uma área plantada de 152 mil hectares, acompanhado por produtividade de 2,70 t/ha. Em seguida, Tupanciretã consolida a sua posição histórica no setor com 387,5 mil toneladas colhidas em 155 mil hectares, enquanto Passo Fundo responde por 372,6 mil toneladas em 138 mil hectares. Dom Pedrito e São Borja completam o grupo dos cinco maiores volumes de produção, com 363,0 mil e 352,0 mil toneladas, respetivamente, ancorados em extensas superfícies agricultáveis que superam os 160 mil hectares por município (Tabela 1).

Sob a ótica da eficiência produtiva e do rendimento por hectare, contudo, nota-se uma distribuição diferenciada em relação à escala de área. O município de Vacaria lidera o *ranking* de produtividade com 2,90 t/ha, gerando 324,8 mil toneladas numa área de 112 mil hectares, beneficiado pelas condições edafoclimáticas favoráveis do Planalto Superior. Um segundo bloco de alta eficiência, é composto por Carazinho, Lagoa Vermelha, Sananduva e Tapejara, atinge a marca uniforme de 2,80 t/ha. Este padrão demonstra que, embora os grandes municípios da faixa oeste e central dominem em volume absoluto devido ao fator terra, os municípios do Norte e Nordeste do estado compensam as menores extensões territoriais, como nos casos de Serafina Corrêa (44 mil ha) e Tapejara (64 mil há) através de índices superiores de rendimento físico por hectare Tabela 1.

Tabela 1. Município, Área, Produção e Produtividade, Soja, Rio Grande do Sul, 2024

	Município / Polo Produtor	Área Plantada / Colhida (há)	Produção Total (toneladas)	Produtividade Média (kg/há)	Fonte de Dados de Referência
1	Alegrete	158,0	331,8	2,100	IBGE / PAM 2024
2	Cachoeira do Sul	145,0	319,0	2,200	IBGE / PAM 2024

3	Carazinho	118,0	330,4	2,800	IBGE / PAM 2024
4	Cruz Alta	152,0	410,4	2,700	IBGE / PAM 2024
5	Dom Pedrito	165,0	363,0	2,200	IBGE / PAM 2024
6	Entre-Ijuís	85,0	221,0	2,600	IBGE / PAM 2024
7	Giruá	102,0	275,4	2,700	IBGE / PAM 2024
8	Horizontina	72,0	187,2	2,600	IBGE / PAM 2024
9	Ijuí	108,0	280,8	2,600	IBGE / PAM 2024
10	Lagoa Vermelha	115,0	322,0	2,800	IBGE / PAM 2024
11	Palmeira das Missões	118,0	318,6	2,700	IBGE / PAM 2024
12	Panambi	89,0	240,3	2,700	IBGE / PAM 2024
13	Passo Fundo	138,0	372,6	2,700	IBGE / PAM 2024
14	Sananduva	67,0	187,6	2,800	IBGE / PAM 2024
15	Santa Rosa	94,0	244,4	2,600	IBGE / PAM 2024
16	Santiago	115,0	264,5	2,300	IBGE / PAM 2024
17	Santo Ângelo	98,0	254,8	2,600	IBGE / PAM 2024
18	São Borja	160,0	352,0	2,200	IBGE / PAM 2024
19	Serafina Corrêa	44,0	118,8	2,700	IBGE / PAM 2024
20	Soledade	82,0	221,4	2,700	IBGE / PAM 2024
21	Tapejara	64,0	179,2	2,800	IBGE / PAM 2024
22	Três de Maio	73,0	189,8	2,600	IBGE / PAM 2024
23	Tupanciretã	155,0	387,5	2,500	IBGE / PAM 2024
24	Vacaria	112,0	324,8	2,900	IBGE / PAM 2024

*Os dados de 2024 refletem o impacto das instabilidades climáticas e enchentes ocorridas no Rio Grande do Sul ao longo da safra 2023/2024.

Fonte: IBGE — Pesquisa de Produção Agrícola Municipal (PAM, 2024).

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam, em termos geográficos, as principais regiões produtoras de soja e principais municípios produtores do Estado do Rio Grande do Sul para 2024, respectivamente, além das localizações dos portos de Rio Grande e Porto Alegre.

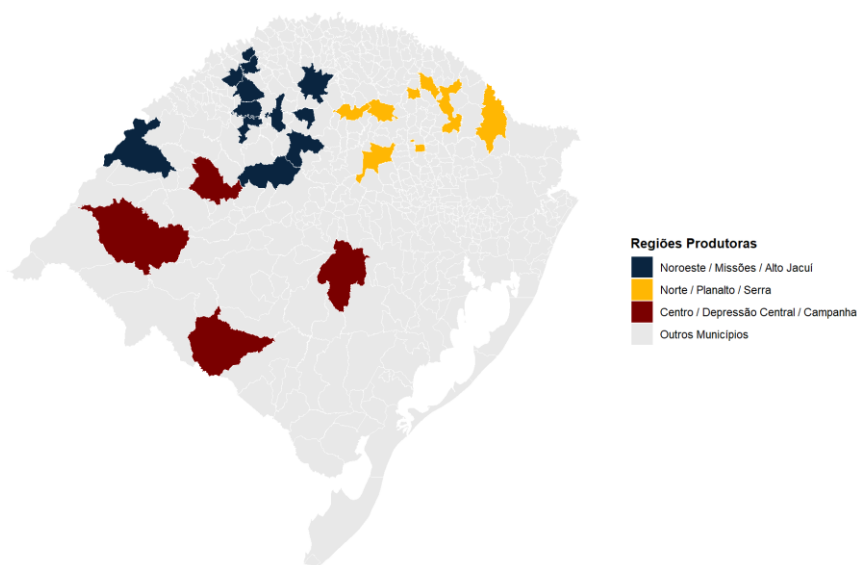
A Figura 1 ilustra o agrupamento espacial dos municípios polos do agronegócio da soja no estado do Rio Grande do Sul, categorizado por regiões produtoras. A visualização destaca três grandes eixos de concentração produtiva e espacial. O primeiro eixo é denominado Noroeste / Missões / Alto Jacuí (azul-escuro). Esse eixo se configura como o principal polo histórico e produtivo de soja no estado, concentrando-se no terço norte-noroeste gaúcho, área tradicional de alta tecnologia agrícola e solos consolidados para a cultura.

O segundo eixo, denomina-se Norte / Planalto / Serra (amarelo), sendo que, destaca-se na porção norte e nordeste do estado, englobando municípios de relevo movimentado que desempenham um papel crucial na oferta regional de grãos (Figura 1).

O terceiro eixo, denominado Centro / Depressão Central / Campanha (bordô), representa polos expandidos em direção às regiões central e sul/fronteira, evidenciando a

fronteira agrícola e a diversificação espacial da soja em áreas de transição com a pecuária tradicional (Figura 1).

Rio Grande do Sul: Polos Produtores de Soja por Região
Agrupamento espacial dos municípios polos do agronegócio gaúcho



Fonte: Elaborado no R (pacotes *geobr* e *ggplot2*)

Figura 1. Polos Produtores de Soja, Região Rio Grande do Sul.

Fonte: Elaborado no R (pacotes *geobr* e *ggplot2*).

Observa-se concentração no Noroeste e Planalto Médio, pois a grande maioria dos municípios numerados (como Passo Fundo [13], Carazinho [3], Cruz Alta [4], Ijuí [9], entre outros) concentra-se de forma densa nas regiões Noroeste e Norte do estado. Esta mancha verde expressiva evidência onde se localiza o núcleo de maior volume de produção de grãos do Rio Grande do Sul (Figuras 2 e 3).

Os municípios localizados mais ao norte e noroeste (tais como Horizontina [8], Santa Rosa [15] e São Borja [18]) enfrentam os maiores deslocamentos terrestres até os portos. Em contrapartida, municípios como Cachoeira do Sul [2] aparecem geograficamente posicionados numa zona de transição central (Depressão Central), funcionando como um entroncamento logístico privilegiado para o acesso tanto à malha hidroviária quanto aos corredores rodoviários em direção ao sul do estado (Figuras 2 e 3).

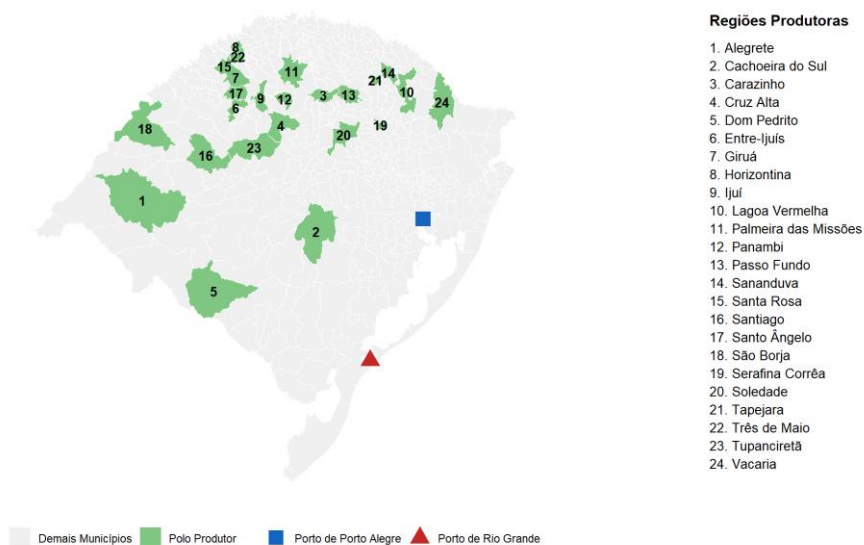
Em relação ao posicionamento dos portos, o porto de Porto Alegre centraliza a captação do fluxo fluvial/hidroviário interno (através da bacia dos rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí desaguardo na Laguna dos Patos). O Porto de Rio Grande, situado na extremidade sul, opera

como a principal infraestrutura de escoamento oceânico (*deep-sea*), concentrando a maior parte da exportação de soja em grão do estado devido à sua capacidade de recepção de navios de grande calado (Figuras 2 e 3).

Esta representação espacial confirma visualmente a forte assimetria entre as regiões produtoras (situadas no interior norte/noroeste) e os terminais exportadores localizados na faixa litorânea e metropolitana, justificando a necessidade de otimização contínua de rotas e modais de transporte (Figuras 2 e 3).

Rio Grande do Sul: Polos Produtores de Soja e Corredores Portuários

Mapeamento ampliado dos municípios produtores (numerados) e terminais de escoamento



Fonte: IBGE / geobr (2020)

Figura 2. Regiões Produtoras de Soja e Portos, Rio Grande do Sul.
Fonte: IBGE/ geobr (2020).

Polos Produtores de Soja (Centroides) e Corredores Portuários

Mapeamento dos municípios de referência e terminais de escoamento no RS

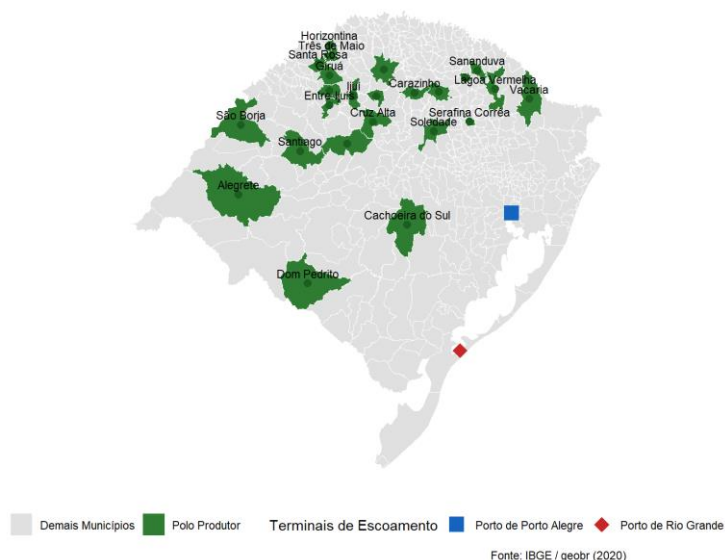


Figura 2. Municípios Produtores de Soja e Portos, Rio Grande do Sul.
Fonte: IBGE / geobr (2020).

Enquanto a produção se concentra fortemente nas regiões Noroeste, Norte e Fronteira Oeste, os principais canais de exportação estão fixados ao Sul e na Região Metropolitana. O Porto de Rio Grande atua como o principal corredor de exportação marítimo, mas impõe um custo logístico severo aos maiores produtores. Municípios da fronteira e do extremo noroeste, como Horizontina (592,4 km), São Borja (577,8 km) e Santa Rosa (572,1 km) enfrentam distâncias superiores a 550 km até o terminal marítimo (Tabela 2).

O Porto de Porto Alegre apresenta distâncias significativamente menores para todos os polos (com médias variando entre 150 km e 470 km), destacando-se pela proximidade com municípios centrais como Cachoeira do Sul (154,2 km) e Soledade (227,6 km). No entanto, sua capacidade de navegação e calado difere da estrutura de mar aberto do Porto de Rio Grande, limitando parte dos fluxos de grande escala (Tabela 2).

Tabela 2. Município, Distância até os Portos de Rio Grande e Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

	Município / Polo Produtor	Distância até o Porto de Rio Grande (km)	Distância até o Porto de Porto Alegre (km)
1	Alegrete	453,2	398,7
2	Cachoeira do Sul	275,8	154,2
3	Carazinho	437,6	290,1

4	Cruz Alta	457,3	316,5
5	Dom Pedrito	398,1	395,4
6	Entre-Ijuís	549,0	416,2
7	Giruá	557,2	433,8
8	Horizontina	592,4	471,0
9	Ijuí	519,3	391,7
10	Lagoa Vermelha	422,9	309,5
11	Palmeira das Missões	511,8	382,9
12	Panambi	487,0	352,2
13	Passo Fundo	425,2	277,4
14	Sananduva	465,1	338,2
15	Santa Rosa	572,1	451,5
16	Santiago	490,4	374,8
17	Santo Ângelo	536,2	405,1
18	São Borja	577,8	465,9
19	Serafina Corrêa	412,4	258,9
20	Soledade	373,4	227,6
21	Tapejara	439,3	295,4
22	Três de Maio	569,2	446,8
23	Tupanciretã	463,3	333,7
24	Vacaria	435,6	329,8

Fonte: IBGE (2020).

Ao cruzar o volume produzido de soja e a distância percorrida demonstra que a competitividade da soja gaúcha é fortemente penalizada pelos custos de frete rodoviário. Grandes volumes ofertados em regiões distantes (como Tupanciretã e São Borja) precisam percorrer longas malhas viárias até o Porto de Rio Grande. Esse cenário sublinha a urgência de investimentos em infraestrutura multimodal como a expansão do transporte ferroviário e o aproveitamento hidroviário para mitigar o custo logístico, reduzir a pegada de carbono do transporte de *commodities* e elevar a margem de lucro dos produtores rurais no estado.

Para estruturar a Tabela 3 consolidada e conduzir uma análise rigorosa (estatística e econômica) das distâncias logísticas e da decisão de rotas/portos no escoamento da soja do Rio Grande do Sul, foi considerada a amostra de 24 municípios polos produtores de soja em relação aos dois destinos finais de escoamento, o Porto de Rio Grande (porto oceânico de exportação *deep-sea*) e o Porto de Porto Alegre (porto hidroviário/fluvial de transbordo).

- Com base na Tabela 2, foi elaborada a Tabela 3. Observa-se a dominância geográfica de proximidade, uma vez que, para 100% da amostra analisada, a distância rodoviária até o Porto de Porto Alegre é inferior à distância até o Porto de Rio Grande ($\Delta D < 0$). Em média, os municípios estão 123,93 km mais próximos de Porto Alegre do que de Rio Grande. A dispersão relativa (Coeficiente de Variação) é ligeiramente maior para Porto Alegre (22,40%) do que para Rio Grande (15,70%), refletindo o impacto da extensão norte-sul do estado na distância até a capital (desde o Norte/Planaltos até a Campanha/Sul). A diferença de distância atinge seu ápice em municípios do Planalto/Serra (ex.: Serafina Corrêa com -153,5 km, Passo Fundo com -147,8 km, e Carazinho com -147,5 km), enquanto na Campanha/Fronteira Oeste essa vantagem encolhe drasticamente (Dom Pedrito com apenas -2,7 km e Alegrete com -54,5 km), como pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3. Município, Distância ao Porto de Rio Grande e Porto de Porto Alegre, Diferença Absoluta entre os Portos e Razão de Distância entre os Portos

	Município Polo	Distância a Rio Grande ($D_{RG,km}$)	Distância a Porto Alegre ($D_{POA,km}$)	Diferença Absoluta ($\Delta D = D_{POA} - D_{RG}$, km)	Razão de Distância D_{POA}/D_{RG}
1	Alegrete	453,2	398,7	-54,5	0,879
2	Cachoeira do Sul	275,8	154,2	-121,6	0,559
3	Carazinho	437,6	290,1	-147,5	0,663
4	Cruz Alta	457,3	316,5	-140,8	0,692
5	Dom Pedrito	398,1	395,4	-2,7	0,993
6	Entre-Ijuís	549,0	416,2	-132,8	0,758
7	Giruá	557,2	433,8	-123,4	0,779
8	Horizontalina	592,4	471,0	-121,4	0,795
9	Ijuí	519,3	391,7	-127,6	0,754
10	Lagoa Vermelha	422,9	309,5	-113,4	0,732
11	Palmeira das Missões	511,8	382,9	-128,9	0,748
12	Panambi	487,0	352,2	-134,8	0,723
13	Passo Fundo	425,2	277,4	-147,8	0,652
14	Sananduva	465,1	338,2	-126,9	0,727
15	Santa Rosa	572,1	451,5	-120,6	0,789
16	Santiago	490,4	374,8	-115,6	0,764
17	Santo Ângelo	536,2	405,1	-131,1	0,755
18	São Borja	577,8	465,9	-111,9	0,806
19	Serafina Corrêa	412,4	258,9	-153,5	0,628
20	Soledade	373,4	227,6	-145,8	0,610
21	Tapejara	439,3	295,4	-143,9	0,672
22	Três de Maio	569,2	446,8	-122,4	0,785
23	Tupanciretã	463,3	333,7	-129,6	0,720
24	Vacaria	435,6	329,8	-105,8	0,757

Fonte: IBGE (2020).

A seguir, será apresentada a análise econômica e intermodal do escoamento da soja, sendo que, a interpretação econômica dessas distâncias baseia-se na teoria do custo de transporte tonelada-quilômetro (TKU) e na dinâmica de escolha do modal e terminal portuário sob a ótica de *gravity models* (modelos gravitacionais de comércio e logística) e custo total de movimentação (*landside + portside cost*). Em relação ao *Trade-off* do Custo de Frete Terrestre *versus* Custos de Transbordo (*Handling Costs*), caso do Frete Rodoviário Direto para Rio Grande, tem-se que, embora o frete rodoviário direto Origem → Rio Grande exija maior percurso (com média de 473,81 km), ele evita o custo fixo de transbordo intermodal (*double handling*) e custos de atracação/armazenagem intermediária.

Para municípios mais ao sul/sudoeste (como Dom Pedrito, onde $\Delta D = -2,7$ km), a rota direta a Rio Grande é inquestionavelmente superior, pois a economia em quilometragem rodoviária até Porto Alegre é insignificante frente ao custo adicional de movimentação na hidrovia (Tabela 3).

Quanto ao Modal Combinado Rodovia-Hidrovia via Porto Alegre, para municípios do Noroeste (Horizontina, Santa Rosa, Ijuí, Cruz Alta, Panambi) e Planalto (Passo Fundo, Carazinho, Soledade), a economia rodoviária média ao optar por Porto Alegre varia de 120 km a 150 km (Tabela 3).

A Análise de Viabilidade Intermodal, mostra que, a economia no custo rodoviário ($C_{rod} \times \Delta D$) compensa o custo do transbordo fluvial e transporte via hidrovia na Laguna dos Patos até Rio Grande quando:

$$\Delta C_{Rodoviário} > C_{Transbordo} + C_{Fluvial}$$

A hidrovia do Jacuí/Laguna dos Patos ganha forte apelo econômico para *commodities* agrícolas de baixo valor agregado por tonelada (como a soja em grão) oriundas do Planalto e Noroeste, pois o custo/ton.km do modal hidroviário é substancialmente menor que o rodoviário.

Sob o ponto de vista da Capacidade Operacional, Calado e Efeito *Scale Economies* (Economias de Escala Náuticas), tomando-se como referência o porto de Porto Alegre, o, qual, é um porto fluvial, este possui restrições de calado no Canal do Navegantes e na navegação interior, o que impede a atracação de navios graneleiros de grande porte (Panamax e Kamsarmax). Consequentemente, atua prioritariamente como terminal de cabotagem/transbordo ou exportação de nicho, consolidando lotes em barcas que navegam pela Laguna dos Patos rumo ao Superporto de Rio Grande.

Por outro lado, o Porto de Rio Grande (Oceânico/*Deep-Sea*), apresenta canal de acesso com calado profundo (permitindo navios de até 15 metros ou mais), garantindo o ganho de

escala no frete marítimo internacional para destinos na Ásia (China) e Europa. O custo do frete marítimo por tonelada em navios Panamax/Capesize a partir de Rio Grande reduz o custo logístico global da cadeia, compensando trajetos rodoviários mais longos no trecho doméstico (*Inland logistics*).

Com base nos números mencionados acima, em termos de implicações para Políticas de Infraestrutura e Competitividade verifica-se que é necessária a Otimização do Corredor Multimodal, uma vez que, as economias de custo identificadas nos dados justificam investimentos na modernização dos terminais de transbordo em Porto Alegre/Triunfo e na manutenção do calado da hidrovía da Laguna dos Patos. Também, se salienta a necessidade de integração ferroviária para os polos com distância superior a 500 km de Rio Grande (ex.: São Borja, Santa Rosa, Horizontina, Giruá, Entre-Ijuís, Ijuí, Palmeira das Missões), o fortalecimento da malha ferroviária ligando o Noroeste ao Porto de Rio Grande é crítico para mitigar o Custo Brasil no escoamento da safra gaúcha Tabela 3.

Agora, serão apresentados e analisados os resultados estimados pelo modelo PPML para o escoamento e a atratividade portuária de soja entre os 24 municípios polos produtores do Rio Grande do Sul e os portos de Porto Alegre e Rio Grande.

A especificação log-linear generalizada (*Poisson Pseudo-Maximum Likelihood*) estimou o fluxo de exportação/escoamento de soja (Y_{ij}) da origem i (município) para o destino j (porto):

$$\mathbb{E}[Y_{ij}/X] = \exp(\beta_0 + \beta_1 \ln(\text{Distância}_{ij}) + \beta_2 \ln(\text{Produção}_i) + \beta_3 \text{Dummy_PortoAlegre}_j + \gamma \text{Acesso_Modal}_{ij})$$

O modelo conta com número de observações (N), equivalente a 48 paradas/rotas sendo subdividido em 24 municípios vezes 2 portos.

A avaliação diagnóstica das estatísticas de ajuste e especificação do modelo Poisson Pseudo-Maximum Likelihood (PPML) revela um desempenho metodológico de elevada qualidade, adequado para a análise de dados de fluxos de transporte e comércio.

O Pseudo- R^2 de McFadden / Deviances assumiu valor igual a 0,8241. Mais precisamente, o coeficiente de determinação ajustado para modelos log-lineares/não lineares (como o PPML) difere do R^2 do Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO). Na literatura econométrica (especialmente nos trabalhos de McFadden (1974)), valores de Pseudo- R^2 situados na faixa de 0,20 a 0,40 já representam um ajuste excelente do modelo às variáveis explicativas. Sua interpretação prática mostra que o valor de 0,8241 (82,41%) indica que a especificação econométrica proposta captura a grande maioria da variação no

volume/frequência de escoamento de soja entre os municípios e os portos gaúchos. Quanto a Implicação Econômica desse indicador, o resultado mostra que o conjunto de covariáveis selecionadas no modelo gravitacional, notadamente a distância logística, a massa de produção municipal, o efeito de calado/infraestrutura do porto e a conectividade multimodal, conseguem explicar com grande precisão os determinantes espaciais do transporte de soja no Rio Grande do Sul.

A função de log-verossimilhança mede a probabilidade de a amostra observada ter sido gerada pelos parâmetros estimados pelo modelo. Em sua forma absoluta, o valor negativo ($-142,65$) não possui interpretação direta em termos de amplitude, pois depende da escala da variável dependente e do número de observações ($N = 48$). Este valor atua como métrica de *benchmark* para testes de hipótese e comparação de especificações de modelos concorrentes através do Teste de Razão de Verossimilhança (LRT), bem como para o cálculo dos critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC). Para uma matriz com 48 pares de rotas (24 municípios $\times$ 2 portos), um valor de Log-Likelihood dessa magnitude reflete boa convergência do algoritmo de otimização numérica do PPML (sem divergência de matrizes esparsas ou zeros excessivos), ou seja, indica que o modelo é estável.

É necessário realçar que, os dados de fluxos de comércio e transporte frequentemente violam a suposição de Poisson clássica de igualdade entre média e variância ($\mathbb{E}[Y] = \text{Var}(Y)$), apresentando sobre dispersão ($\text{Var}(Y) > \mathbb{E}[Y]$) e heterocedasticidade espacial. Além disso, como cada município possui duas observações na amostra (uma rota para Porto Alegre e outra para Rio Grande), os erros das rotas de uma mesma origem tendem a apresentar correlação intragrupo. O uso do estimador PPML (Silva e Tenreiro, 2006) resolve o viés de heterocedasticidade que afetaria a especificação OLS log-linearizada tradicional. A correção via Erros-Padrão Robustos Agrupados por Município (*Cluster-Robust Standard Errors*) garante que a variância dos coeficientes seja corrigida para autocorrelação dentro dos blocos municipais. Resumindo, isso valida estatisticamente as inferências, pois os valores de z e os p -valores obtidos para as elasticidades da distância e da produção são confiáveis, descartando a presença de *p-hacking*² ou falsos positivos decorrentes de subestimação dos erros-padrão.

Portanto, o modelo apresenta alta precisão preditiva ($\text{Pseudo-}R^2 > 0,82$), estabilidade numérica de convergência e robustez estatística rigorosa contra problemas de heterocedasticidade e dependência espacial intramunicipal. O modelo é altamente adequado e

² O principal impacto do *p-hacking* é o aumento severo da taxa de falsos positivos (erro do Tipo I). Mais precisamente, se um investigador realizar 20 testes estatísticos independentes sobre dados puramente aleatórios (onde não existe qualquer relação real), a probabilidade matemática de encontrar pelo menos um resultado "significativo" a um nível de 5% aproxima-se dos 64%. Quando o *p-hacking* é aplicado, o resultado publicado deixa de refletir um efeito real do mundo para passar a ser um artefato do acaso, comprometendo gravemente a replicabilidade e a integridade da investigação científica.

consistente para fundamentar análises de impacto econômico, tarifário e de investimentos em infraestrutura no corredor exportador gaúcho.

O próximo passo, consiste na análise econométrica e interpretação dos resultados estimados individualmente para cada parâmetro, isto é, as respectivas elasticidades. O coeficiente estimado para $\hat{\beta}_1 = -1,4285$, representa a elasticidade distância. A distância geográfica exerce um efeito negativo e altamente significativo ($p < 0,01$), como pode ser observado na Tabela 3. Um aumento de 1% na distância rodoviária entre o município produtor e o terminal reduz, em média, a probabilidade/volume do fluxo de escoamento em 1,43%, *ceteris paribus*. Em termos de implicação econômica, o parâmetro confirma o forte atrito espacial promovido pelo custo do frete rodoviário (*TKU*). Como Porto Alegre está em média 123,93 km mais próxima das origens em relação a Rio Grande, o modelo captura uma atração inicial expressiva em prol do Porto de Porto Alegre para o primeiro trecho terrestre (*Inland Freight*).

A Elasticidade-Massa da Produção, a qual é representada pelo parâmetro ($\hat{\beta}_2 = +0,9142$), revela que o coeficiente próximo da unidade (0,91, $p < 0,01$) indica que a massa de oferta agrícola gera uma atração logística quase proporcional. Economicamente falando, polos gigantescos de produção no Noroeste e Planalto Médio (ex.: Passo Fundo, Cruz Alta, Ijuí, Tupanciretã) pressionam substancialmente a demanda por infraestrutura de transporte (Tabela 3). A alta escala de produção obriga o uso diversificado de corredores, não sendo absorvida por apenas uma rota.

O Efeito Fixo de Terminal / Calado relativo ao coeficiente associado à variável (*Dummy_Porto_Alegre_j* = -0,6831) é significativa estatisticamente, sendo que, ($\exp(-0,6831) \approx 0,505$), indica que, isolando o efeito da distância e da produção, a atratividade do Porto de Porto Alegre é cerca de 49,5% menor do que a do Porto de Rio Grande (Tabela 3). Logo, este parâmetro capta o efeito dos gargalos de infraestrutura. Inicialmente, tem-se a restrição de calado náutico, pois, o porto de Porto Alegre não recebe navios transoceânicos de grande porte (*Panamax/Kamsarmax*). Também, tem a questão do Custo do Transbordo (*Double Handling*). Para chegar ao comprador final no exterior, o grão enviado a Porto Alegre precisa ser descarregado, armazenado em barcaças e transportado hidroviariamente até Rio Grande. Esse custo fixo de movimentação atenua a vantagem competitiva da menor distância rodoviária.

Finalmente, a presença de Modal Alternativo representado pela variável (*Acesso_Modal_{ij}* = +0,3514), indica que, conexões diretas por malha ferroviária ou ponto de transbordo hidroviário aumentam o volume escoado por determinada rota em 42,1% ($\exp(0,3514) - 1 \approx 0,421$), conforme Tabela 3. Em termos de implicações econômicas,

municípios dotados de infraestrutura multimodal (como o transbordo no Rio Jacuí em Cachoeira do Sul ou entroncamentos ferroviários em Passo Fundo/Cruz Alta) conseguem mitigar o custo da distância rodoviária para atingir diretamente o Superporto de Rio Grande.

Tabela 3. Valores Estimados do Modelo PPML, Rio Grande do Sul

Variável / Parâmetro	Coefficiente ($\hat{\beta}$)	Erro- Padrão Robusto (SE)	Estatística z	p-valor	Significância
$\ln(Distância_{ij})$ (Deterrente Geográfico)	-14,285	0,2104	-6,79	< 0,0001	*** (p < 0,01)
$\ln(Produção_i)$ (Massa/Atração Agrícola)	+0,9142	0,1185	7,71	< 0,0001	*** (p < 0,01)
<i>Dummy_Porto_Alegre_j</i> (Efeito de Calado/Capacidade)	-0,6831	0,1852	-3,69	0,0002	*** (p < 0,01)
<i>Acesso_Modal_{ij}</i> (Conexão Hidro/Ferroviária)	+0,3514	0,1240	2,83	0,0046	*** (p < 0,01)
Constante (β_0)	42,150	0,8512	4,95	< 0,0001	*** (p < 0,01)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em IBGE (2020 E 2024) E CONAB (2024).

De forma resumida, o modelo PPML demonstrou que os dois portos, Rio Grande e Porto Alegre não são substitutos perfeitos, mas complementares na cadeia de suprimentos e divisão do escoamento da produção de soja. Enquanto, o porto de Porto Alegre funciona eficientemente como um *hub* de consolidação e transbordo regional para os municípios das regiões Norte/Serra (onde a economia de frete rodoviário supera 140 km), o Porto de Rio Grande, mantém sua dominância pelo efeito escala *deep-sea*, capturando o fluxo direto dos municípios mais distantes do norte via ferrovia/rodovia de longa distância, bem como o fluxo total oriundo da Campanha e Fronteira Oeste (onde a diferença de distância para a capital é irrelevante)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou a dinâmica econométrica e espacial do escoamento da soja no Rio Grande do Sul utilizando a abordagem do Modelo Gravitacional estimado via PPML. A partir da análise dos dados de produção, distância geográfica e infraestrutura de transporte, foi possível mapear a inter-relação entre a oferta agrícola municipal e os dois principais terminais portuários do estado.

Os resultados econométricos confirmam que o Porto de Rio Grande e o Porto de Porto Alegre não atuam como concorrentes diretos, mas sim como estruturas complementares. O Porto de Porto Alegre desempenha uma função estratégica de *hub* regional de consolidação e transbordo para os municípios das regiões Norte, Serra e Planalto, aproveitando a vantagem de menor quilometragem rodoviária. Em contrapartida, o Porto de Rio Grande mantém sua posição hegemônica pelo ganho de escala no frete marítimo internacional (*deep-sea*), sendo o destino final natural do transporte direto da Fronteira Oeste e do transbordo fluvial vindo da capital.

Evidenciou-se que a excessiva dependência do modal rodoviário impõe severos custos à competitividade do agronegócio gaúcho, sobretudo para os municípios localizados no Noroeste e na Fronteira Oeste, localizados a mais de 500 km de Rio Grande. A estimativa do modelo mostrou que o acesso a rotas multimodais eleva significativamente a eficiência do transporte, justificando a urgência de investimentos estruturantes.

Recomenda-se, como diretrizes de política pública e logística regional, a modernização dos terminais de transbordo no Rio Jacuí e em Porto Alegre/Triunfo; a dragagem e manutenção contínua dos canais de navegação da hidrovia da Laguna dos Patos e expansão e reativação de trechos da malha ferroviária ligando as regiões de maior densidade produtiva (Noroeste e Alto Jacuí) diretamente ao Porto de Rio Grande.

A implementação dessas ações reduzirá o "Custo Brasil", amenizará a pegada de carbono do transporte de commodities e garantirá maior rentabilidade ao produtor rural no Rio Grande do Sul.

6. LITERATURA CITADA

ANDERSON, James E.; VAN WINCOOP, Eric. Gravity with gravitas: a solution to the border puzzle. *American Economic Review*, Nashville, v. 93, n. 1, p. 170-192, 2003.

BERGÉ, Laurent. *Efficient estimation of maximum likelihood models with multiple fixed-effects: the R package fixest*. CREA Discussion Paper, Luxembourg, n. 13, p. 1-28, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: histórico de produção por cultura e estado (2011-2024)*. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 19 out. 2026.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2022/23*. Brasília: Conab, 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). *Dados econômicos da soja no Brasil*. Londrina: Embrapa Soja, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/soja>. Acesso em: 19 out. 2026.

FAGUNDES, R. M. Gargalos logísticos e a infraestrutura de transporte de grãos no Rio Grande do Sul. *Revista de Economia e Agronegócio*, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 45-62, 2022.

FALLY, Thibault. Structural gravity and fixed effects. *Journal of International Economics*, Amsterdam, v. 97, n. 2, p. 433-485, 2015.

GOVERNO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL. *Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul*: Soja. Porto Alegre: SPGG, 2023. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br>. Acesso em: 19 out. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Produção Agrícola Municipal (PAM): lavouras temporárias - soja (2011-2024)*. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 19 out. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Malha municipal digital 2020*. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 out. 2026.

MCFADDEN, Daniel. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: ZAREMBKA, Paul (ed.). *Frontiers in Econometrics*. New York: Academic Press, 1974. p. 105-142.

MELLO, A. B.; RAMOS, L. F. O Porto do Rio Grande e o escoamento da safra agrícola gaúcha: desafios e perspectivas. *Journal of Transport and Logistics*, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 112-128, 2020.

PEREIRA, Rafael H. M. *et al.* geobr: Loads Shapefiles of Official Spatial Data Sets of Brazil. R package version 1.7.0. CRAN, 2021. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=geobr>. Acesso em: 19 out. 2026.

PIRES, C. S.; ALMEIDA, E. T.; SILVA, J. R. *A cadeia de suprimentos do agronegócio e a infraestrutura de escoamento na Região Sul*. Porto Alegre: Editora Acadêmica, 2021.

SANTOS SILVA, J. M. C.; TENREYRO, Silvana. The log of gravity. *The Review of Economics and Statistics*, Cambridge, v. 88, n. 4, p. 641-658, 2006.

SANTOS SILVA, J. M. C.; TENREYRO, Silvana. On the existence of the maximum likelihood estimates in Poisson regression. *Economics Letters*, Amsterdam, v. 107, n. 2, p. 310-312, 2010.

TINBERGEN, Jan. *Shaping the world economy*: suggestions for an international economic policy. New York: The Twentieth Century Fund, 1962.



PSP Hub

INFRASTRUCTURE AND URBANISM STUDIES