

ANÁLISE DOS FATORES DETERMINANTES DA ESCALA DE PRODUÇÃO DE FERROVIAS BRASILEIRAS DE 2006 A 2017: O QUE SE PODE CONCLUIR?#

ANALYSIS OF THE DETERMINING FACTORS OF THE SCALE OF PRODUCTION OF BRAZILIAN RAILROADS FROM 2006 TO 2017: WHAT CAN WE CONCLUDE?

*Francisco Gildemir Ferreira da Silva**

*Viviane Adriano Falcão***

*Marcelo Pereira Queiroz****

Hélio Queiroz Júnior[◇]

recibido: 18 febrero 2022 – aceptado: 22 agosto 2022

Resumo

As informações sobre a operação e produtividade geradas em 25 anos de concessões de ferrovias no Brasil permitem ampliar os conhecimentos a respeito do comportamento da gestão destas infraestruturas com o mapeamento de medidas econômicas associadas à iniciativa privada. Este trabalho objetiva compreender os motivos dos ganhos de escala durante os 25 anos observados de concessão ferroviárias, e como esses ganhos/perdas se comportaram durante os anos. Para tanto, este trabalho utilizou o método não paramétrico DEA para mensurar escala de produção de ferrovias no período de 2006 a 2017 e avaliou, utilizando modelos lineares, fatores

° Ferreira da Silva, F.G., Falcão, V.A., Pereira Queiroz, M., & Queiroz Júnior, H. (2024). Análise dos fatores determinantes da escala de produção de ferrovias brasileiras de 2006 a 2017: o que se pode concluir? *Estudios económicos*, 41(82), pp. 273-297, DOI: 10.52292/j.estudecon.2024.3178

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio de bolsas 422898/2018-0.

* Universidade Federal do Ceará, Universidade de Brasília, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5980-3769>. E-mail: gildemir@ufc.br

** Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0850-4281>. E-mail: ae1542@coventry.ac.uk, viviane.afalcao@ufpe.br

*** Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6999-0108>. E-mail: marcelo.queiroz@unb.br

◇ Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1057-7271>. E-mail: helio.junior@ufpe.br

do processo que se relacionassem à variação de escala. Os resultados destacam a velocidade comercial na exigência de baixa escala para açúcar, carvão, cimento e derivados de petróleo, e a insuficiência de investimento em vagões e locomotivas, instigando a revisão de contratos da década anterior para investigar a influência no nível da escala.

Palavras-chave: concessão ferroviária, análise envoltória de dados, modelos lineares, Brasil.

Códigos JEL: R42, L51, L92.

Abstract

The information on the operation and productivity generated in 25 years of railroad concessions in Brazil allows expanding knowledge about the behavior of the management of these infrastructures with the mapping of economic measures associated with the private sector. This work aims to understand the reasons for the gains of scale during the 25 years of railway concession observed and how these gains/losses behaved over the years. Thus, this work used the DEA non-parametric method to measure the scale of railway production in the period from 2006 to 2017 and evaluated, using linear models, process factors that relate to scale variation. The results highlight the commercial speed in the low scale requirement for sugar, coal, cement and petroleum products, and the insufficient investment in railcars and locomotives, prompting the review of contracts from the previous decade to investigate the influence at the scale level.

Keywords: railway concession, data envelopment analysis, linear models, Brazil.

JEL codes: R42, L51, L92.

INTRODUÇÃO

Nos últimos 30 anos, ocorreram mudanças administrativas na esfera federal¹, sendo descentralizada a administração de empresas públicas ou a efetiva desativação destas. No caso ferroviário, estes anos de reforma institucional foram caracterizados pela substituição da Rede Ferroviária Federal SA (RFFSA) por operadores privados (Castro, 2000). O aparato jurídico desta reforma se encontra na teoria da regulação (Viscusi, et al., 2000; Kon, 1999). A justificativa da substituição da provisão de um bem público pela iniciativa privada se ampara em supostos ganhos de eficiência na operação e na abertura comercial do Brasil no final da década de 90 (ver Schumpeter, 1961; Manheim, 1980; Scherer, 1980; Stendl, 1983; Coelli, et. al., 1997; Rus et al., 2006).

As ferrovias são um caso bem descrito na literatura de monopólio natural, apresentando economias de escala por definição (Baumol, 1982) e funcionando em uma estrutura de economias de rede. Além disso, ferrovias apresentam retornos de longo prazo nos investimentos (Da Silva et al., 2009), e a produção ferroviária envolve retornos de escala, economias de rede e de densidade, e atendimento à hipótese de subaditividade de custos, conforme explicado por Ivaldi e McCullough (2004) e Bitzan (2003). A compreensão da evolução de escala fomentaria decisões quanto a verticalizar ou não a operação e a manutenção de ferrovias pautadas por mudanças em bem-estar no sentido econômico, tal como ocorrido na Europa e cogitado para o caso brasileiro entre 2010 a 2014, mas não efetivado. As contribuições de estudos científicos que corroboram os aspectos acima são detalhadas em Mizutani (2020).

Segundo Waters (2007) existiram vários estudos de escala de produção de ferrovias iniciados em Borts (1952, 1954, 1960) e recentemente carreados por Bitzan (2000, 2003) e Friebel, Ivaldi e Pouyet, (2013); Ivaldi (2005); Ivaldi e McCullough (2009); Ivaldi, McCullough e Linari (2002); Mizutani (2005); Mizutani et al. (2015); Mizutani e Shoji (2004); Mizutani e Uranishi (2013), referentes à economia de escala, escopo e de densidade de ferrovias como foco na estrutura de mercado em que as ferrovias poderiam se enquadrar (monopólio) via suposição da separabilidade de custos proposta em Baumol (1977). Na linha destes trabalhos, há investigações com métodos não paramétricos apontados em Fukui (1992); e Sueyoshi et al. (1997), mas suplantados por métodos paramétricos conforme Ivaldi (2005); Ivaldi e McCullough (2004) e Mizutani e Uranishi (2020).

¹ Esfera federal é sinônimo para governo Federal do Brasil, conforme utilizado no Art. 204. da Constituição Federal do Brasil de 1988.

No caso brasileiro, há evidências de ganhos ou constância na eficiência das ferrovias brasileiras para o período de 1969 a 1983 (Da Silva et al., 2018) com decréscimo no período de 1980 a 1996 e retomada pós concessões de 1996 até a atualidade, além de ganhos de eficiência com a operação conjuntada pós fusão (Da Silva et al., 2020). Também foram encontradas evidências para retornos nos investimentos de ferrovias de longo prazo (Da Silva et al., 2009) e retornos de escala intensos em ferrovias Heavy Haul (Da Silva, 2018). No tocante à produtividade heterogênea das concessionárias ferroviárias de carga brasileira, diferentes autores confirmaram a existência: Marchetti (2019); Pereira, Luis e Mello, João (2014); Gabriele et al. (2013); Moreira, Ferreira e Soares de Mello (2019); Pereira, Rosa e Lunkes (2015); Santos (2011); Da Silva et al. (2019); Wanke e Fleury (2006), e, por fim, também envidenciou-se que a separação de infraestrutura da operação não apresenta relevância em economias de escopo na operação separada, indicando que verticalização ou fusão implicaram em ganhos de produtividade (Castello Branco, 2008).

Mostram-se investigações relevantes de eficiência e produtividade; contudo, pouca investigação da evolução das escalas de produção. Além disso, os estudos apontados acima são marcados por métodos não paramétricos de dados em um corte transversal. Nesta linha, e olhando para as pesquisas internacionais, objetiva-se neste trabalho investigar como as concessões ferroviárias de carga brasileiras atuais, durante o período de 2006 a 2017, comportaram-se quanto a escala, tentando mensurar relações com variáveis que possam explicar as decisões de ampliação ou redução de escala das concessionárias.

Para mensurar a escala se propõe uma abordagem não paramétrica, pois estas avançaram durante os últimos tempos nos aspectos de robustez em testes estatísticos (Banker et al., 2004; Banker & Natarajan, 1993, 2008; e Banker, Zheng & Natarajan, 2010) havendo uma variedade de métodos como *Data Envelopment Analysis* (DEA), *Free Disposal Hull* (FDH), *Stochastic Data Envelopment Analysis Framework* e *StoNED* (ver, por exemplo, Azad et al., 2020; Deprins, Simar & Tulkens, 2006; Kortelainen, 2008; Kortelainen & Kuosmanen, 2016; Kuosmanen e Kortelainen, 2011; Wanke & Affonso, 2010).

Neste sentido, este artigo avança na compreensão dos fatores que levaram a economias de escala em ferrovias brasileiras durante os 25 anos de concessões. Para tanto, utiliza-se o método não paramétrico DEA com testes estatísticos propostos em Banker et al. (2004); Banker e Natarajan (1993, 2008) e utilizando também uma proposta multicritério de seleção das variáveis para as construções dos modelos com base em Benegas e Da Silva (2014) e Reis et al. (2017). Este artigo analisa, ainda, as relações de escala com outras variáveis de forma descritiva, utilizando

regressões e sistemas de equações. Os resultados avançam metodologicamente na mensuração de escalas e na compreensão dos fatores que levam a ganhos/perdas de escala em diferentes contextos, por exemplo: a velocidade comercial exige baixa escala para açúcar, carvão, cimento e derivados de petróleo; a escala diminui com investimentos insuficientes em material rodante; as revisões contratuais mudaram o nível da escala; entre outros.

I. RELAÇÃO ENTRE ECONOMIAS DE ESCALA E ESCOPO

As definições clássicas de economias de escala e de escopo dependem da integração das etapas do processo produtivo e do uso dos insumos com repercussão na produção e no custo que fomentam decisões das empresas de produzir mais ou menos por unidade de disponibilidade da planta de produção, ou seja, tornar mais ou menos densa a produção. Neste sentido, esta seção indica que a relação entre a função de produção e a função de custo pode ser utilizada com métodos não paramétricos para medir nível de economia de escala e economia de escopo, e para identificar uma relação possível com a densidade de produção.

I.1. Função de Produção, retornos de escala e a mensuração com método não paramétrico DEA

Uma função de produção é a relação sobrejetora entre a máxima de quantidade produzível de um produto e os fatores de produção necessários para realizar a produção, devendo ser monótona e crescente. Diferentes níveis tecnológicos propiciam que esta curva desloque para cima ou para baixo. Uma revisão deste tipo de função foi realizada por McFadden (1978), que explorou as diferentes formas funcionais possíveis de produção e custo, e por Melvyn (2008), que resumiu as funções de produção com avanços apontados em Bayanjargal, Yerkyebulan e Batt-sukh (2020) em novas classes de função de produção. A função de produção pode ser representada de forma simplificada com um produto e um insumo, conforme a Equação 1:

$$y = f(x) \tag{1}$$

Onde x é a quantidade de insumos e indica a produção máxima alcançada com a tecnologia utilizada.

A resposta do produto total, quando todos os fatores produtivos aumentam proporcionalmente, são denominados retornos de escala. Assim, se a função de produção for homogênea $f(\alpha \cdot x) = \alpha^g \cdot f(x)$, então se $g > 0$, tem-se aumento do retorno da escala; se $g < 0$, os retornos são decrescentes com a escala da produção; e se $g = 0$, tem-se que os retornos são constantes de escala. Portanto, a produção mostra retornos crescentes, decrescentes ou constantes de escala quando um aumento proporcional em todos os fatores produtivos leva a um aumento na produção mais que proporcional, menor que proporcional ou igualmente proporcional. Neste sentido, há diminuição no custo marginal de produção à medida que a escala de operações de uma planta aumenta, ou seja, uma redução nos custos unitários devido ao aumento de volume produzido. Em linha com Waters (2007), Bitzan (2000 e 2003), Ivaldi (2005) e Ivaldi, Mccullough e Linari (2002) apontam que as funções de custos, e, conseqüentemente, as economias de escala, são medidas considerando a mudança de custo após uma alteração nos insumos, na produção, no número de conexões a serem atendidas e no comprimento da rede. Bereskin (2012) indica que as economias (e deseconomias) de escala podem ser demonstradas pelo formato da função de custo médio a longo prazo, mas exigindo para o caso de longo prazo, que não é observável, uma avaliação da função de custo com base na simulação do tipo “e se”. Uma vez conhecida a função de produção, é possível otimizar o uso dos fatores de produção e obter economias de escala, para garantir a máxima eficiência econômica na produção. Se há retornos constantes de escala, então o produto vetorial dos insumos pelo produto marginal para todos os insumos é igual à função linear de custo, e o produto marginal do insumo é o preço dele.

Em métodos não paramétricos, assume-se comportamento dos conjuntos de dados que implicam em condições de otimização para escalas ótimas de operação, assumindo ou competição perfeita, para o caso de retornos constantes de escala, ou imperfeita, para o caso de retornos variáveis. A eficiência calculada no caso do retorno constante pode ser decomposta em eficiência pura (variável) e de escala, ou seja, se a empresa em análise é grande ou pequena. Há pressupostos de estratégia da operação nas propostas não paramétricas, orientando-se a otimização à redução de insumos ou à maximização da produção. Neste sentido, a relação entre dois modelos não paramétricos pensados em maximizar insumo ou produto, e assumindo retornos constantes ou variados de escalas, se prestam a verificar se há uso total de escala ou não. Se a relação for igual a um, então a escala de produção é máxima utilizada; caso contrário, não.

Segundo Mattos e Terra (2015), para o caso de modelos DEA para retornos constantes e variáveis de escala, cujos acrônimos são CCR (Charnes, Cooper & Rhodes, 1978) e BCC (Banker, Charnes & Cooper, 1984), respectivamente, a comparação

dos modelos e a possibilidade da decomposição da eficiência relativa de cada unidade de comparação, chamada de DMU, em eficiência técnica e eficiência de escala.-

I.2. Modelos DEA, mensuração da escala e estimação da relação escala e variáveis de interesse

Os trabalhos de Banker et al. (2004) e Banker e Natarajan (1993 e 2008) indicam como usar modelos DEA para entender escala e testar se são crescentes ou não. Conjuntamente com a inserção de métodos de escolha de variáveis na linha de Benegas e Da Silva (2014) e Reis et al. (2017) pode-se vasculhar a amplitude de modelos possíveis na fronteira de produção. Assim, utilizando-se os modelos DEA com retornos constantes (CCR) e com retornos variáveis de escala (BCC), os retornos foram estabelecidos utilizando-se os modelos CCR e BCC, conforme as Equações 3 e 8, respectivamente. Com m é a quantidade de DMU, s é o número de outputs e i o número de variáveis de inputs.

$$\max_{\mu, v} \theta_{ccr} = \sum_{j=1}^m \mu_j y_{i, j_0} \quad (2)$$

$$s. a \sum_{i=1}^m \mu_i y_i - \sum_{i=1}^s v_i x_{ij} \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, j, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^s v_i x_{i,0} = 1 \quad (4)$$

$$\mu_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, s \quad (6)$$

$$\max_{\mu, v} \theta_{bcc} = \sum_{j=1}^m \mu_j y_{i, j} - \mu_0 \quad (7)$$

$$s. a \sum_{i=1}^m \mu_i y_i - \sum_{i=1}^s v_i x_{ij} + \mu_0 \leq 0 \quad \forall j = 1, \dots, j, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^s v_i x_{i,0} = 1 \quad (9)$$

$$\mu_i \geq \varepsilon \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$v_i \geq \varepsilon \quad \forall i = 1, \dots, s \quad (11)$$

$$\mu_0 \text{ livre em sinal} \quad (12)$$

As variáveis θ_{CCR} e θ_{BCC} são redução aplicada a todos os insumos das DMU em análise no caso de retornos constantes e variáveis de escala, respectivamente; $y_{i,j0}$ é a quantidade de produto observado r da unidade o ; $x_{i,0}$ é a quantidade de insumo observado i da unidade o ; μ_i é o peso dado ao produto i ; v_i é o peso dado ao insumo i ; n é o número de unidades; s é o número de produtos; m é o número de insumos; $\sum_{i=1}^s v_i x_{i,0} = 1$ define a faceta; μ_0 é a variável que representa os retornos de escala.

Dyson et al. (2001) recomenda, seguindo Bardhan et al. (1996), Bowlin (1998) e Golany, Roll e Rybak (1994), que, como regra, verificar se há uma relação entre o número de DMU e a quantidade de variáveis para inputs e outputs utilizados na modelagem. Nesta linha, sugere-se que as DMU sejam iguais a duas vezes a soma de inputs e outputs. Em bases com muitas variáveis, esta regra é muito adequada para redução de dimensões em bases de dados, havendo abordagem alternativas, como as propostas por Benegas e Da Silva (2014), que apontam a possibilidade de redução de dimensionalidade com uso de análise, mas com o problema de perda de explicação. Notoriamente, a proposta parte de uma avaliação de combinação de inputs e outputs que gerem o maior número discriminatório do modelo.

A escala é obtida pela decomposição, realizada dividindo-se θ_{CCR} por θ_{BCC} , conforme a Equação 13:

$$\frac{\theta_{CCR}}{\theta_{BCC}} = \theta_{scale} \quad (13)$$

Note que o escore de eficiência calculado com retornos variáveis de escala nunca será inferior àquele calculado com retornos constantes de escala, ou seja, sempre ocorrerá que $\theta_{BCC} \geq \theta_{CCR}$. Isso porque, no modelo BCC, as DMU têm maior flexibilidade na avaliação de suas produções. Logo, $0, 0 \leq \theta_{scale} \leq 11$. Esse escore será tanto maior quanto mais apropriada for a escala de operação da DMU. Com ele é possível avaliar o quanto da ineficiência da DMU é devida a sua incapacidade técnica e o quanto é devida ao fato de ela não estar sendo produzida na escala apropriada.

Em outra linha, investigando a ampliação da definição de variáveis para um modelo DEA, Reis et al. (2017) sugerem o uso de um algoritmo baseado em um método multicritério para a seleção de variáveis.

Nas propostas de Growitsch, Jamasb e Pollitt (2009) e Wetzel (2009) ocorrem a adoção do número de funcionários, número material rodante e o comprimento da rede como variáveis inputs para desenvolvimento da proposta do modelo

integrado e separado. Alternativamente, o número de funcionários e o número de material rodante são substituídos pelas despesas operacionais variáveis monetárias (OPEX). Essa variável representa o total de despesas operacionais, incluindo custos de pessoal, materiais, encargos externos, impostos, depreciação, ajustes de valor e provisões para contingências. A extensão da rede, embora parta do custo de capital, é um ativo de longa duração, sendo um insumo quase fixo no modelo e reflete o impacto no custo das diferenças na estrutura e densidade da rede. Na proposta, os outputs testados são TKU, trens formados e trens passageiros quilômetros.

Para a proposta deste artigo, desenvolveu-se um mix simplificado das propostas dadas por Benegas e Da Silva (2014) e Reis et al. (2017) utilizando os passos um a três do algoritmo de Reis et al. (2017), iniciando por uma combinação, tal como em Benegas e Da Silva (2014), sem uso do coeficiente de Ionai e adotando as variáveis iniciais apontadas em Da Silva (2020). O algoritmo desenvolvido é descrito abaixo:

- *Passo 1:* Escolher quantidade de variáveis para o modelo com base na regra de Dyson et al. (2001) [(número de *inputs*+número de *outputs*) *2 = número de DMU].
- *Passo 2:* Escolher variáveis de *inputs* e *outputs* presente no modelo de Growitsch, Jamasb e Pollitt (2009), Wetzl (2009).
- *Passo 3:* Executar combinações das variáveis escolhidas com número de *inputs* encontrados no passo 1.
- *Passo 4:* Executar modelos DEA, escolhendo o retorno de escala e a orientação adequada ao propósito de análise, utilizando a linguagem de programação R, com as combinações de *inputs* e *outputs*, e armazenar média da estimação das eficiências para cada combinação.
- *Passo 5:* Escolher a combinação de variáveis que maximiza a média das eficiências e minimiza a soma de DMU com eficiência máxima.

A proposta tenta eliminar medidas ad hoc, mantendo a lógica de penalizar os modelos que possuem mais unidades eficientes.

I.3. Seleção das variáveis de input e output do modelo DEA

Os dados foram retirados do Anuário Estatístico da ANTT de 2018 (ANTT, 2020), no intervalo de 2006 a 2017, da movimentação de cargas em Toneladas Útil, Toneladas-km, número de vagões, número de trens formados, número de locomo-

tivas, número de funcionários, acidentes e outras variáveis de acompanhamento da regulação, conforme estabelecido nos contratos de concessão.

Conforme a ANTT, o conteúdo da publicação é informativo nos termos da Resolução ANTT nº 2.502/2007. Considerando esse contexto informativo, esses dados podem não representar fidedignamente a realidade da produção e dos insumos usados pelas ferrovias. Para aumentar a confiabilidade nesses dados e possibilitar o acompanhamento e estudo do setor pela sociedade, é sugerido que eles sejam submetidos a um processo de avaliação de qualidade dos dados. Correia (2004) cita alguns critérios para avaliação dessa qualidade, tais como consistência, exatidão e precisão. A representação e análise desses dados no contexto espacial também poderia proporcionar análises considerando aspectos geográficos e aplicação de ferramentas de análise espacial. Essa análise espacial também está sujeita a critérios de qualidade de dados espaciais, os quais já são aplicados em normas elaboradas pela Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais-INDE (BRASIL, 2020) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017).

Os dados foram estruturados em um painel de 121 observações mensais para cada concessionária estudada, contendo variáveis de insumos e de produção disponibilizadas pela ANTT em 11 anos de acompanhamento das concessionárias. As variáveis analisadas foram TKU, NTF, CCL, UL, UV e NF, sendo representadas por:

- TKU (OUTPUT): toneladas por quilômetro útil, que corresponde ao somatório do produto entre o volume transportado, em toneladas úteis (TU), e a distância percorrida, em quilômetros (km), de cada composição transitada na malha concedida ou na malha de outras ferrovias, na realização do transporte de carga própria ou de terceiros;
- NTF (INPUT): número de trens formados, que corresponde ao número total de trens de carga formados no período;
- CCL (INPUT): consumo de combustível, representando o somatório da quantidade de combustível, em litros (l), consumido pelas locomotivas diesel-elétricas utilizadas para o desempenho das operações de transporte, manobra e serviço;
- UL (INPUT): utilização de locomotiva de frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de locomotivas utilizadas no transporte de carga, inclusive em carga própria, em locomotiva. hora, por modelo de locomotiva própria, arrendada, alugada, de outras concessionárias e de terceiros no período considerado;
- UV (INPUT): utilização de vagão frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de vagões carregados no serviço

remunerado e carga própria, em vagão. dia, por tipo dos vagões próprios, arrendados, alugados e de terceiros (exceto de outras ferrovias), no período considerado; e

- NF (INPUT): número de empregados por lotação, sendo igual ao total de empregados por área de atuação e por tipo de vínculo empregatício com a concessionária, sendo “próprios” para os empregados com vínculo empregatício com a concessionária, ou “terceirizados” para os trabalhadores de empresas contratadas para a prestação de serviços nas instalações da concessionária, levantado no último dia do mês informado.

Na Tabela 1 são apresentadas várias variáveis que também são utilizadas na análise dos fatores de demanda, notoriamente Toneladas Útil por produtos (TU), e nos fatores de produção: vagões, Velocidade Comercial (VMC), Velocidade Média no Percurso (VMP), número de funcionários (Pessoas), Percurso Médio por locomotiva, Acidentes por ano, Acidentes Falha Humana por ano, Número de Locomotivas Médio, Disponibilidade de Locomotivas, Locomotivas utilizadas, Consumo Combustível TKU, Consumo Combustível TKB, Percurso Médio Locomotiva, Número de Vagões Médio por hora, Disponibilidade de Vagões, Vagões utilizados, Número de Vagões Médio, Produção Média Vagão TU, Produção Média Vagão TKU, entre outros.

A base de dados possuía muitas variáveis de insumos e produtos que poderiam ser discricionários ou importantes para a compreensão da escala e da eficiência, entretanto, muitas informações podem se sobrepor no procedimento de estimação. Isto é um problema comum de dimensionalidade e que pode acarretar erros de medidas que comprometeriam a análise de escala proposta na seção 3.2. Utilizando-se o mix simplificado das propostas dadas por Benegas e Da Silva, (2014) e Reis et al. (2017) várias variáveis da Tabela 1 foram excluídas, restando as que fomentaram os testes e mensuração de escala apresentados na seção que segue.

Desta forma, da base de dados, as variáveis discricionárias abaixo foram utilizadas: ML, UVh, UVm, CLKTU, para diferenciar escalas entre ferrovias, almejando identificar característica que podem discriminar a operação e manutenção das ferrovias.

- ML: número de manutenções realizadas por locomotiva;
- UVh: Unidades de vagão utilizados por horas;
- UVm: unidades de vagão médio; e,
- CLTKU: Consumo de litros de combustível por TKU.

Tabela 1. Estatística descritiva das variáveis

Variável	Média	Mediana	D.P.	Mín	Máx
ML	3.08E+03	499	4.81E+03	0	1.95E+04
UVh	8.47E+03	7.27E+03	7.07E+03	63.9	2.09E+04
UVm	6.66E+03	2.61E+03	1.28E+04	434	7.81E+04
CLTKU	9.1	9.04	4.87	1.76	19.9
TKU	2.59E+10	1.39E+10	3.35E+10	9.83E+07	1.30E+11
UL	3.18E+03	2.53E+03	2.73E+03	12	1.09E+04
NTF	4.04E+04	2.61E+04	3.40E+04	1.56E+03	1.25E+05

Fonte: elaboração própria.

Os dados obtidos no procedimento para o modelo DEA foram: NTF, ML, UVh, UVm e CLTKU. Infelizmente o tamanho das amostras foi reduzido, pois não havia dados de manutenção de locomotivas de 2006 a 2009. Então, de forma a ter um modelo com mais observações, estimaram-se também modelos CCR e BCC, assumindo-se como := TKU, e := UL, TF, UVh, CLTKU e NTF.

II. RESULTADOS E DISCUSSÕES

II.1. Testes e Mensuração de Escala de Produção

Na sequência foram calculadas as estatísticas de teste de retornos de escala com base nos trabalhos de Simar e Wilson (2002) para verificar que modelo adotar na avaliação de economias de escopo para cada uma das concessionárias. A hipótese nula do teste é se adoto retornos constantes de escala e a hipótese alternativa é se adoto o modelo de retornos variáveis; complementarmente, pode-se testar a hipótese nula de retornos não decrescentes de escala versus hipótese alternativa de retornos variáveis de escala. As estatísticas e os testes são apresentados na Tabela 2. A hipótese nula é não rejeitada quando seu valor é um.

Os testes de retornos de escala assumem o crescimento dos insumos e produção proporcional (retornos constantes de escala) ou desproporcional para mais insumos para menos produção ou para mais insumos gerando mais produção, respectivamente, retornos decrescentes e crescentes de escala. Uma flexibilização nas hipóteses de *free-disposal* de funções de produção e conjuntos de produção permite o reconhecimento de comportamentos que não sejam crescentes nem decrescentes

Tabela 2. Teste de retorno de escala por concessionária

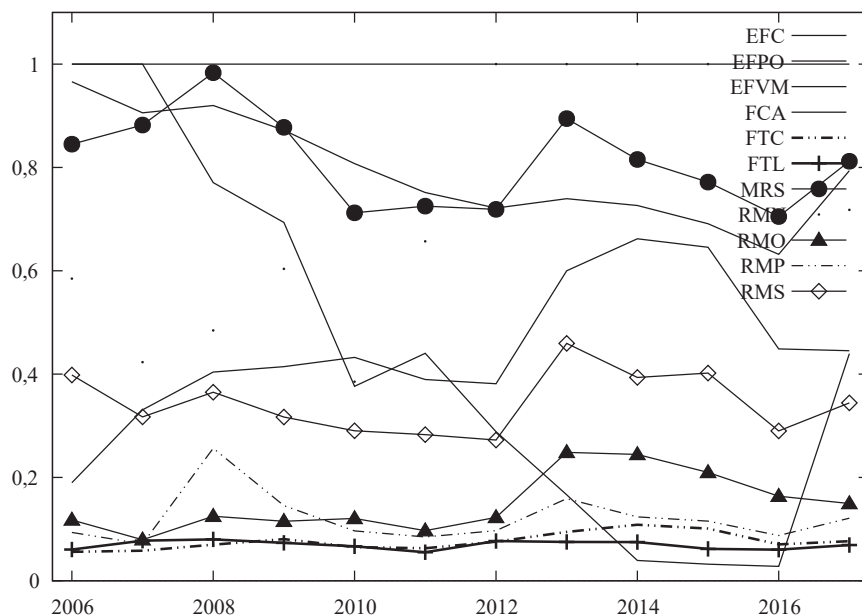
Concessionária	EFC	EFPO	EFVM	FCA	FTC	FTL	MRS	RMN	RMO	RMP	RMS
Hipótese de Retornos Constantes											
P valor	0.038	0.005	0.003	0.008	0.004	0.018	0.21	0.005	0.023	0.065	0.006
H ₀ rejeitar	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
<i>cut-off</i>	0.976	0.681	0.975	0.957	0.943	0.943	0.99	0.848	0.969	0.984	0.975
Hipótese de Retornos Não Crescentes											
P valor	0.043	0.001	0.001	0.003	0.003	0.006	0.21	0.004	0.009	0.046	0.005
H ₀ rejeitar	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
<i>cut-off</i>	0.975	0.819	0.984	0.962	0.956	0.952	0.99	0.884	0.975	0.985	0.975

Legenda: EFC- Estrada de Ferro Carajás; EFPO-Estrada de Ferro Paraná Oeste; EFVM- Estrada de Ferro Vitória-Minas; FCA- Ferrovia Centro-Atlântica; FTC-Ferrovia Teresa Cristina; FTL-Ferrovia Transnordestina Logística; MRS- MRS logística; RMN-Rumo Malha Norte; RMO – Rumo Malha Oeste; RMP-Rumo Malha Paulista; RMS-Rumo Malha Sul. Na análise 0 implica em rejeitar a hipótese nula e 1 em não rejeitar.
Fonte: elaboração própria.

em escala. Na literatura, os testes de Banker et al. (2004), Banker e Natarajan (1993) e Banker e Natarajan (2008) permitem flexibilizar a hipótese de *free-disposal*. Simar e Wilson (2002) consolida esta abordagem e apresenta um teste de fácil execução com modelos CCR e VCR.

Nota-se, pelo teste, que somente a concessionária MRS não tem evidências para rejeitar a hipótese de retornos constantes ou não crescentes de escala, podendo assumir retornos crescentes. A RMP não pode rejeitar o comportamento de retornos não crescentes, sendo estes adequados para modelar a maioria das ferrovias. Utilizaram-se modelos de retornos constantes de escala para elaborar o Gráfico 1 de evolução da escala de produção das concessionárias de 2006 a 2017, contudo, saliente-se que o caso da MRS e da RMP podem ser questionados.

Gráfico 1: Evolução da Escala de Produção das Concessionárias de Ferrovias Brasileiras.



Fonte: elaboração própria.

Um modelo linear foi estimado para um painel de dados de 2006 a 2017 para investigar se há fatores observados que sejam relevantes para aumento ou redução de

escala. Para tanto, adotou-se, como variável explicativa, a Escala medida no procedimento anterior e as variáveis de Velocidade Média Comercial (VMC), Trens Formado (TrensForm), Locomotiva Média Útil (LocoMedioU), Vagões Horas Diárias (VagHorasD), Consumo de Combustíveis por TKU (ConsCombustTKU), Produto Médio de Vagão por TKU (ProdM_Vag_TKU) e Percurso Médio por Locomotiva (PercMedioLoco). As variáveis escolhidas foram apresentadas nos dados da Tabela 1, contudo, o procedimento de escolha dos modelos para mensuração de escala as excluiu. Nesta regressão, pretende-se compreender como estas variáveis contribuem para a determinação da escala de produção. Estas variáveis foram definidas a partir de um processo *stepwise* com exclusão de variáveis não significantes, portanto, sem base teórica.

A estimação de modelos lineares para investigar descritivamente relações entre variáveis é uma prática comum em investigações científicas, conforme Baltagi (2013) e Hsiao (2007), embora seja mais adequado optar por uma estrutura teórica para sustentar as relações investigadas. Assim, para ter uma descrição empírica dos fatores que influem na escala, estimou-se a equação 14 com painel de fatores aleatórios após realizada a estimação em *pooled* e verificada pela Estatística de teste Breusch-Pagan ($LM = 55.5219$ com $p\text{-valor} = \text{prob}(\text{qui-quadrado}(1) > 55.5219) = 9.24257e-014$) e pela Estatística de teste de Hausman ($H = 4.29508$ com $p\text{-valor} = \text{prob}(\text{qui-quadrado}(5) > 4.29508) = 0.50776$) a existência de efeitos aleatórios no modelo.

$$\begin{aligned}
 \widehat{\text{Escala}} = & -0.0340177 - 0.00530200.VMC + 2.42711e - 006.TrensForm - 0.000625169.LocoMedioU \\
 & (0.10894) \quad (0.0027580) \quad (9.3152e - 007) \quad (0.00028232) \\
 & + 2.37173e-005.VagHorasD + 0.00530224.ConsCombustTKU + 1.28480e-007.ProdM_Vag_TKU \\
 & (5.5304e - 006) \quad (0.0057772) \quad (1.2069e-008) \\
 & \quad \quad \quad + 1.41739e - 005 PercMedioLoco \\
 & \quad \quad \quad (4.6088e - 006) \\
 T = & 1211n \quad L = 56.5595 \quad \hat{\sigma} = 0.15621
 \end{aligned} \tag{14}$$

(erros padrão entre parênteses)

Os valores entre parênteses são as estatísticas t e indicam que os números de trens formados (NTF), as locomotivas utilizadas (UL), os vagões utilizados por hora (UVh) e as produtividades médias dos vagões e das locomotivas são fatores determinantes da escala. A velocidade média comercial também é um fator, sendo significativa a 10% e apresentando, curiosamente, relação negativa, ou seja, ao aumentar a velocidade, reduz-se a escala, o que ocorre também com a Locomotiva média utilizada. Os outros fatores são elevadores de escala. O consumo de combustível por TKU não é significativo estatisticamente, mas o resultado indica positividade no parâmetro, o que é natural. Há de se salientar que são fatores de oferta, portanto, dependentes da existência de demanda, o que é investigado na equação 15.

$$\begin{aligned}
 \widehat{\text{Escala}} = & 0.205335 + 4.69849e - 009.TU_MINFER_aaa + 5.55363e - 008.TU_PRODAGRI - 3.16816e - 008.TU_AC \\
 & (0.066117) (1.0468e - 009) \quad (1.8273e - 008) \quad (2.0242e - 008) \\
 + & 3.17152e - 008.TU_SOJAFAR - 2.07593e-008.TU_CARV - 1.61300e-007.TU_CIM + 3.74946e-00.TU_SID \\
 & (1.6732e - 008) \quad (2.8913e - 008) \quad (8.0264e - 008) \quad (2.1761e - 008) \\
 & -1.62849e - 008.TU_DERPETR + 1.73996e - 007.TU_CONT \quad (15) \\
 & (3.8541e - 008) \quad (6.1686e - 008)
 \end{aligned}$$

$$T = 121 \quad \ln L = 46.9586 \quad \hat{\sigma} = 0.17061 \\
 \text{(erros padrão entre parênteses)}$$

A Equação 15 foi estimada em painel de fatores aleatórios após realizada a estimação em *pooled* e verificada pela Estatística de teste Breusch-Pagan: LM = 12.6976 com p-valor = prob (qui-quadrado (1) > 12.6976) = 0.000366135 e a Estatística de teste de Hausman: H = 12.809 com p-valor = prob (qui-quadrado (9) > 12.809) = 0.171439, a existência do modelo de efeitos aleatórios. Observam-se como relevantes, do lado de demanda para a escala de produção, o TU de minério, produtos agrícolas, soja em farelo, produto siderúrgico e containers, sendo todos significantes a 10%. Os produtos que prejudicam o aumento de escala são açúcar, carvão, cimento e derivados de petróleo, contudo, sendo significante a 10% apenas o parâmetro do cimento.

II.2. Discussões dos resultados

Observando o Gráfico 1, a Estrada Ferroviária Carajás (EFC) foi a ferrovia que teve escala máxima possível durante o período de análise. Esse resultado é em linha com os trabalhos de Wanke e Fleury (2006), Pereira, Luis e Mello, João (2014), Da Silva (2018), e Moreira, Ferreira e Soares de Mello (2019).

A dinâmica da mudança de escala não foi estudada em outros trabalhos, sendo este inovador nesse sentido, e apresentado a EFPO partiu da escala máxima possível e decresceu em escala até o mínimo de 0.02786 em 2014 e 0.439563 em 2017. A EFVM e a MRS possuíam escalas de produção variáveis durante o período de análise, mas com pouca variabilidade (0.1026) e 0.08829 de desvio padrão. A Ferrovia Transnordestina Logística (FTL) apresentou escala com a amplitude de 0.08013 a 0.05521, atingindo o mínimo em 2011 e o máximo, em 2008. As concessionárias do grupo Rumo Logística (RMO e RMP) apresentaram níveis semelhantes de escala com médias de 0.1494 e 0.1210, medianas de 0.1237 e 0.1063, desvios padrões de 0.05616 e 0.04974 e amplitude entre 0.07933 e 0.2485, e entre 0.07130 e 0.2564, respectivamente. Embora o trabalho seja pioneiro em estudar a dinâmica das escalas das concessionárias ferroviárias brasileiras, trabalhos como Da Silva et al. (2009), Pereira, Luis e Mello, João (2014); Marchetti (2019), Gabriele et al. (2013), e Da Silva et. al. (2019) apontam para ganhos e perdas de eficiência

que mimetizam o comportamento encontrado, alinhando os resultados à relação entre eficiência e escala encontrada no trabalho de Da Silva (2022), a coerência nos resultados é imediata.

Já as outras empresas do grupo Rumo Logística (RMN e RMS) possuem níveis de escala maior e são monotonicamente semelhantes ao resultado de Da Silva et al. (2020), embora este estudo tenha focalizado o impacto das fusões nos ganhos de eficiência, e esta dimensão não tenha sido carregada neste trabalho, com destaque para RMN que teve máximo de aproveitamento da escala nos anos de 2012 a 2015 com redução em torno de 25% nos anos de 2016 e 2017 em comparação aos anos de escala máxima. A RMS teve nível máximo de 0.4595, mas com desvio-padrão de 0.05929.

No que tange aos fatores de produção e demanda, observou-se que transportar minério e produtos agrícolas exige maior escala de produção que é obtida por aumentar números de trens formados, as locomotivas utilizadas, os vagões utilizados por hora e as produtividades médias dos vagões e das locomotivas. Não obstante, esses fatores são bem documentados em estudos paramétricos de separabilidade de produção e escala, como os de Ivaldi (2005); Ivaldi, McCullough e Linari (2002); e Ivaldi e McCullough (2009) e as relações encontradas são bem próximas. Entretanto, curiosamente, a velocidade comercial deve ser controlada, pois ao aumentar, necessita-se reduzir a escala. Isto talvez ocorra em decorrência da falta de sincronia entre pontos de carga e descarga e do uso da ferrovia como estoque de produto, sendo passível de investigação.

Nota-se que o transporte de açúcar, carvão, cimento e derivados de petróleo não induz a aumento de escala, provavelmente pelas peculiaridades deles, pois são produtos que geram contaminação dos vagões, exigindo cuidados diferentes dos minérios e transporte de produtos agrícolas. O produto majoritário do grupo RUMO é o açúcar, podendo ser um dos motivos das escalas menores nas suas ferrovias. À exceção da ferrovia RMN, que transporta muitos produtos agrícolas, com redução de escala nos anos de 2016 e 2017, provavelmente pela inserção de açúcar nas suas cargas transportadas.

A FTL transporta muitos derivados de petróleo, logo com baixa exigência de escala. Além disso, a velocidade comercial dela é baixa, o que corroboraria para aumento de escala. Contudo, pouco da sua rede é utilizada. Portanto, as eficiências são baixas, tendo repercussão na escala medida pelo método DEA. Trata-se, portanto, de um problema de nível de eficiência. Isso ocorre de forma semelhante na Ferrovia Centro Atlântica e é observado no Gráfico 1 e corroborado pelos resultados dos parâmetros.

A EFVM e a MRS são ferrovias que transportam majoritariamente minério, contudo, com alguns problemas de operação dadas as interferências urbanas nos trajetos que elas percorrem no Sudeste. Sendo este fator não medido neste estudo, os níveis de escala delas podem não ter sido influenciados por fatores de produção ou demanda, porém, exógenos a operação.

Estes resultados quanto ao transporte de produtos específicos e alinhamento com escala são estudos no nível teórico e empírico em Waters (2007); Borts (1952, 1954, 1960); Fukui (1992); Sueyoshi et al. (1997); e Mizutani e Uranishi (2020). Fazendo o devido corte das peculiaridades brasileiras, estes estudos balizam bem o encontrado e indicam robustez nos resultados, o que torna válido para o modo de transporte ferroviário no que tange a sua abrangência mundial.

Por fim, a Ferrovia Teresa Cristina (FTC) transporta majoritariamente carvão e, conforme o modelo, não exige aumento de escala. Este fato é corroborado pela participação do produto siderúrgico na demanda do transporte ferroviário e sustentado pela motivação de uso deste transporte para fins de exportação de minério e não para consumo interno.

CONCLUSÕES

Este artigo objetivou compreender os motivos dos ganhos de escala durante os 25 anos observados de concessões ferroviárias e como esses ganhos/perdas se comportaram durante os anos. Neste sentido, avaliou a relação entre nível de escala e fatores de produção e de demanda que expliquem os níveis de produção praticados pelas ferrovias de carga brasileiras, avançando, inclusive, em produtos específicos transportados pelas concessionárias ferroviárias brasileiras. Os resultados apontam para relação positiva entre nível de escala e de eficiência. Observa-se uma relação linear entre fatores produtivos relevantes estatisticamente e a economia de escala. A exceção foi observada na velocidade comercial e na exigência de baixa escala para os produtos açúcar, carvão, cimento e derivados de petróleo. Os produtos geram algum conhecimento de ineficiência recorrente de algumas ferrovias e do uso restrito dos insumos.

Do ponto de vista prático, os achados sugerem que algumas variáveis podem ser flexibilizadas no próximo contrato de concessão, e outras, que são escolhas da concessionária, não trazem grande retorno em eficiência e podem servir como referência para escolha dos produtos e do seu modelo de negócio. Assim, alguns itens dos contratos de concessões podem ser revistos, pois as ferrovias não exploram

seu potencial devido a fatores, às vezes exógenos, embora haja a possibilidade de interpretação de haver falta de um setor mais agressivo de captação de carga.

Academicamente, o avanço metodológico, de síntese da literatura e de aplicação ao caso brasileiro, condensado à dinâmica de crescimento e decrescimento das escalas de produção das ferrovias com fatores explicativos, inovou e dá uma nova dimensão em estudos de eficiência feitos no Brasil. Os estudos de eficiência ou escala concentravam-se em medir a eficiência e os insumos manipuláveis para melhorar a produção; neste estudo, investigam-se relações e associações que explicam fatores de produção, mas, também, elementos não controláveis pela concessionária.

Por seu turno, observando os fatores de produção, pode-se concluir que há necessidade de investimento em vagões e locomotivas para ampliar escala de algumas concessões, exceto a EFC pelas peculiaridades inerentes ao seu transporte e relação com a empresa VALE. Portanto, captar demanda por si só não aumentaria a escala. Isso sugere que algumas concessionárias podem ter limites diferente de escala do que outras por questões conjunturais ou de capacidade de investimento, o que pode ser analisado em outro artigo.

Adicionalmente aos fatos encontrados, pode-se pensar em delineamento de elementos contratuais, particularmente metas de produção que não são factíveis, exigindo, portanto, da agência reguladora, revisão no método de estabelecimento de metas de produção.

Ressalte-se que há limitação das medidas realizadas, pois os dados disponíveis pela ANTT precisam de auditoria quanto à qualidade, tendo sido realizado neste trabalho apenas um ajuste no domínio dos dados de produção e insumo que deveriam atender. Caso ocorressem desvios absurdos da tendência, tentou-se ajustar com consulta aos órgãos do possível valor real. Sugere-se então que as novas pesquisas investiguem relações dinâmicas e não-lineares entre escopo, escala e densidade de produção e da estrutura ideal da indústria com a propriedade de subaditividade de custo, contribuindo metodologicamente e com informações para entender os ganhos das concessões para um país.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Transportes Terrestres (2020). Anuário Estatístico Ferroviário – Ano 2018 (Base 2006-2018) Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT. <https://www.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>. Acesso em 29/06/2020.
- Azad, M., Wanke, P., Raihan, M., Anwar, S. & Mustafa, R., (2020). Bank efficiency in Bangladesh revisited: a slack-based network DEA approach. *Journal of Economic Studies*, 47(5), 1001-1014.
- Baltagi, B. (2013). *Econometric analysis of panel data* (5ª ed.). Chichester: John Wiley & Sons.
- Banker, R. D., Charnes, A. & Cooper, W. W. (1984). Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9), 1078-1092. <https://doi.org/10.1287/mnsc.30.9.1078>.
- Banker, R. & Natarajan, R. (2011). Statistical Tests Based on DEA Efficiency Scores. In W. Cooper, W., L. Seiford & J. Zhu (eds). *Handbook on Data Envelopment Analysis. International Series in Operations Research & Management Science* (2nd ed.). (Chapter 11, pp. 273-295). Boston, MA.: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6151-8_11
- Banker, R. & Natarajan, R. (2008). Evaluating contextual variables affecting productivity using data envelopment analysis. *Operations Research*, 56(1), 48-58.
- Banker, R., Cooper, W., Seiford, L., Thrall, R. & Zhu, J. (2004). Returns to scale in different DEA models. *European Journal of Operational Research*, 154(2), 345-362.
- Banker, R., Zheng, Z. & Natarajan, R. (2010). DEA-based hypothesis tests for comparing two groups of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, 206(1), 231-238.
- Bardhan, I., Bowlin, W., Cooper, W. & Sueyoshi, T. (1996). Models and measures for efficiency dominance in DEA - Part I: Additive models and MED measures. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 39, 322-332.
- Baumol, W. (1977). On the Proper Cost Tests for Natural Monopoly in a Multiproject Industry. *American Economic Review*, 67(5), 809-822.
- Baumol, W. (1982). Applied fairness theory and rationing policy. *The American Economic Review*, 72(4), 639-651.
- Bayanjargal, D., Yerkyebulan, B. & Battasukh, T. (2020). A New Class of Production Function. *Theoretical Economics Letters*, 10(02), 356-365.
- Benegas., M. & Da Silva, F. (2014). Estimação da eficiência técnica do SUS nos estados Brasileiros na presença de insumos não-discricionários. *Revista Brasileira de Economia*, 68(2), 171-196.

- Bereskin, C. (2012). Railroad economies of scale. scope. and density revisited. *Journal of the Transportation Research Forum*, 48(2).
- Bitzan, J. (2000). Railroad Cost Conditions: Implications for Policy. *NDSU*, 137(9), 1689-1699.
- Bitzan, J. (2003). Railroad Costs and Competition Networks. *Journal of Transport Economics and Policy*, 37(2), 201-225.
- Borts, G. (1952). Community Preference Fields Published by: *The Econometric Society Stable*, 20(1), 71-79. <http://www.jstor.org/stable/1906943>.
- Borts, G. (1954). Concept of increasing returns. *Journals UCHICAGO*, 316-333.
- Borts, G. (1960). American Economic Association. *The American Economic Review*, 50(3), 319-347.
- Bowlin, W. (1998). Measuring Performance: An Introduction to Data Envelopment Analysis (DEA). *The Journal of Cost Analysis*, 15(2), 3-27.
- BRASIL (2020) Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE. Disponível em: <https://www.inde.gov.br/NormasPadroes>. Acesso em: 05/08/2020.
- Castello Branco, J. (2008). A segregação da infraestrutura como elemento reestruturador do sistema ferroviário de carga no Brasil. *Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes*, 209.
- Castro, N. (2000). Os Desafios da Regulação do Setor de Transporte no Brasil. *Revista de Administração Pública – Mimeo*. <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rap/article/view/6309>.
- Charnes, A., Cooper, W. & Rhodes, E. (1978). Measuring the Efficiency of Decision-Making Units. *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)
- Coelli, T., Rao, D., O'Donnell, C. & Battese, G. (2005). An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis, 10.1007/978-1-4615-5493-6.
- Correia, D. & Yamashita, Y. (2004). Metodologia para identificação da qualidade da informação: uma aplicação para o planejamento de transportes. *Transportes*, 12(1). <https://doi.org/10.14295/transportes.v12i1.126>
- Da Silva, F. (2018). Estudo da produção de ferrovias tipo heavy hall brasileiras a luz da teoria econômica. *Anais do XXXII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes- ANPET*. Gramado. Brasil.
- Da Silva, F. (2020). Brazilian Railways Relations of Production Density. Scale. Scope and Efficiency. <https://ssrn.com/abstract=3681559>. Acessado em: 05/06/2020.
- Da Silva, F., Macambira, J. & Rocha, C. (2019). Medindo a Eficiência Produtiva do Transporte por Ferrovias Brasileiras: uma Aplicação dos Modelos DEA e Tobit. *Pesquisa e Planejamento Econômico*, 49(3), 153-186.

- Da Silva, F., Oliveira, R. & Marinov, M. (2020). An Analysis of the Effects on Rail Operational Efficiency Due to a Merger between Brazilian Rail Companies: The Case of RUMO-ALL. *Sustainability*, 12(12), 4827.
- Da Silva, F., Prado, M. & Nascimento, C. (2018) A RFFSA entre 1969 e 1993: um Estudo Empírico. *Revista SODEBRAS*, 13(146).
- Deprins, D., Simar, L. & Tulkens, H. (2006). Measuring Labor-Efficiency in Post Offices. In *Public goods. environmental externalities and fiscal competition*. [s. l.: s. n.].
- Dyson, R., Allen, R., Camanho, A., Podinovski, V., Sarrico, C. & Shale, E. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of Operational Research*, 132(2), 245-259.
- Friebel, G., Ivaldi, M. & Pouyet, J. (2013). Separation versus integration in international rail markets: A theoretical investigation, TSE Working Papers.
- Fukui, K. (1992). Japanese National Railways privatization study: The experience of Japan and lessons for developing countries. *The World Bank*.
- Fumitoshi, M., Andrew, S., Chris, N. & Shuji, U. (2015). Comparing the Costs of Vertical Separation. Integration. and Intermediate Organisational Structures in European and East Asian Railways. *Journal of Transport Economics and Policy*, 49(3), 496-515. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/jtranseconpoli.49.3.0496>
- Gabriele, P., Brandão, L., Treinta, F., De Mello, J. & Carvalhal, R. (2013). Comparação internacional da eficiência ambiental dos modos de transporte rodoviário e ferroviário. *Journal of Transport Literature*, 7(1).
- Golany, B., Roll, Y. & Rybak, D. (1994) Measuring Efficiency of Power Plants in Israel by Data Envelopment Analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management*.
- Growitsch, C., Jamasb, T. & Pollitt, M. (2009). Quality of service. efficiency and scale in network industries: An analysis of European electricity distribution. *Applied Economics*, 41(20), 2555-2570.
- Hsiao, C. (2007). Panel data analysis-advantages and challenges. *Test*, 16, 1-22.
- IBGE (2017) Avaliação da qualidade de dados geoespaciais. Manuais Técnicos em Geociências Nº 13. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE*. <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101152.pdf>.
- Ivaldi, M. (2005). Restructuring Railways: In Theory and Practice. *CESifo DICE Report*, 03(4), 3-9.
- Ivaldi, M. & McCullough, G. (2004). Subadditivity Tests for Network Separation Using a Generalized McFadden Cost Function. *Center for Economic Policy Research*.
- Ivaldi, M. & McCullough, G. (2009). Subadditivity Tests for Network Separation with an Application to U.S. Railroads. *Review of Network Economics*, 7(1).

- Ivaldi, M., McCullough, G. & Linari, C. (2002) Railroad Mergers: A Structural Econometric Perspective, 1-26.
- Kon, A. (1999). *Economia Industrial*. São Paulo: Nobel.
- Kortelainen, M. (2008). Dynamic environmental performance analysis: A Malmquist index approach. *Ecological Economics*, 64(4), 701-715.
- Kortelainen, M. & Kuosmanen, T. (2016) Measuring Eco-Efficiency of Production: a Frontier Approach. *Journal of Economic Literature*.
- Kuosmanen, T. & Kortelainen, M. (2011). Valuing Environmental Factors in Cost-Benefit Analysis Using Data Envelopment Analysis. *SSRN Electronic Journal*, 62(1), 56-65.
- Manheim, M. (1980) *Fundamental of Transport System Analysis – vol. 1: Basic concepts*. Boston, Massachusetts: MIT press.
- Marchetti, D. (2019). Efficiency in Rail Systems Through Three Different Approaches and Contributions to Push the Brazilian Rail System Toward High Performance. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/19480>. Acessado em: 10/06/2020.
- Mattos, E. & Terra, R. (2015). Qualidade do Gasto Público. Avaliação da Qualidade do Gasto Público e Mensuração da Eficiência, 211-233.
- Mcfadden, D. (1978). Estimation techniques for the elasticity of substitution and other production parameters *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Applications Volume II: Applications of the Theory of Production*. 1978. <http://ideas.repec.org/h/hay/hetcha/fuss1978-11.html>
- Melvyn, M. (2008) A Survey of Function Form in the Economic Analysis of Production Economics.
- Mizutani, F. (2005) Regulation and Deregulation in the Japanese Rail Industry. *CESifo DICE report*, 3(4), 10-15.
- Mizutani, F. (2020). A comparison of vertical structural types in the railway industry: A simple mathematical explanation model. *Research in Transportation Economics*, 81(16), DOI:10.1016/j.retrec.2020.100865.
- Mizutani, F. & Shoji, K. (2004). Rail operation-infrastructure separation: The case of Kobe rapid transit railway. *Transport Policy*, 11(3), 251-263.
- Mizutani, F. & Uranishi, S. (2020). An analysis of the inter-effect of structural reforms and rail mode share. *Research in Transportation Economics*, (17), 100-862.
- Mizutani, F. & Uranishi, S. (2013). Does vertical separation reduce cost? An empirical analysis of the rail industry in European and East Asian OECD Countries. *Journal of Regulatory Economics*, 43(1), 31-59.
- Moreira, L., Ferreira, W. & De Mello, J. (2019). Cálculo de eficiência na alocação de mão de obra em estações ferroviárias da malha do Rio de Janeiro por meio da análise envoltória de dados (DEA). *Transportes*, 27(4), 24-35.

- Pereira, L. & Mello, J. (2014). Eficiência Técnica Das Concessionárias Ferroviárias Nacionais Usando Análise Envoltória De Dados. *Relatórios De Pesquisa Em Engenharia De Produção*, 14.
- Pereira, M., Rosa, F. & Lunkes, R. (2015) Análise da eficiência ferroviária no Brasil nos anos entre 2009 a 2013. *Transportes*, 23(3), 56.
- Reis, J., Sacramento, K., De Mello, J. & Meza, L. (2017). Avaliação de eficiência das ferrovias Brasileiras: Uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e representação gráfica bidimensional. *Revista Espacios*, 38(14), p. 16. <http://www.revistaespacios.com/a17v38n14/a17v38n14p16.pdf>. Acessado em 05/06/2020.
- Rus, G., Campos, J. & Nombela, G. (2006). *Economía del Transporte*. Antoni Bosch Editor.
- Santos, M. (2011). Avaliação da Eficiência Produtiva das Ferrovias de Carga No Brasil : Uma Aplicação da Metodologia DEA. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes - Centro de Tecnologia. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará.
- Scherer, F. M. (1980). *Industrial Market Structure and Economic Performance* (2nd edition). Chicago: Rand McNally.
- Schumpeter, J. (1961). *Capitalism, Socialism and Democracy*. London: Allen & Unwin.
- Simar, L. & Wilson, P. (2002). Non-parametric tests of returns to scale. *European Journal of Operational Research*, 139(1), 115-132.
- Stendl, I. (1983). Stefan Constantinescu. *Arta Bucuresti*, 30(6).
- Sueyoshi, T., Machida, H., Sugiyama, M., Arai, T., & Yamada, Y. (1997) Privatization of Japan national railways: DEA time series approaches. *Journal of the Operations Research Society of Japan: JORSJ. - Tokyo Soc*, 40(2), 0453-4514, 205.
- Viscusi, W., Vernon, J. & Harrington, Jr. (2000). *Economics of Regulation and Antitrust* (3rd Edition). London: The MIT Press Cambridge. Massachusetts.
- Wanke, P. & Fleury, P. (2006). Transporte de cargas no Brasil: estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos. Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil. *Instituto Econômica de Pesquisa Aplicada – IPEA*. p. 56. https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/capitulo_12_transportes.pdf.
- Wanke, P. & Affonso, C. (2010). Determinantes da eficiência de escala no setor brasileiro de operadores logísticos. *Production*, 21(1), 53-63.
- Waters, W. (2007). Evolution of Railroad Economics. *Research in Transportation Economics*, 20(1), 11-67
- Wetzel, H. (2009). European Railway Deregulation: Essays on Efficiency and Productivity of European Railways. *PhD Dissertation*.

© 2024 por los autores; licencia no exclusiva otorgada a la revista Estudios económicos. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-No Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0) de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>

