

Michel Bittencourt Weber

**ESTIMAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TERMINAIS PORTUÁRIOS DE  
CONTÊINERES POR MEIO DE ANÁLISE DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA  
DE PRODUÇÃO**

**Brasília – DF**

**Abril/2019**

**ESTIMAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TERMINAIS PORTUÁRIOS DE  
CONTÊINERES POR MEIO DE ANÁLISE DE FRONTEIRA  
ESTOCÁSTICA DE PRODUÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como parte dos requisitos  
para obtenção do grau de Especialista em  
Governança e Controle da Regulação em  
Infraestrutura.

Aluno: Michel Bittencourt Weber

Orientador: Prof. Doutor Geraldo Sandoval  
Góes

## **ESTIMAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TERMINAIS PORTUÁRIOS DE CONTÊINERES POR MEIO DE ANÁLISE DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA DE PRODUÇÃO**

Autor: Michel Bittencourt Weber

Eficiência. Fronteira estocástica. Terminais portuários.

Este trabalho analisa a eficiência técnica de instalações portuárias brasileiras especializadas em movimentação de contêineres. É utilizado para isso o método de análise de fronteira estocástica de produção. Analisa-se as particularidades da seleção de modelos a partir dos subconjuntos de fatores de produção. Mostra-se que a área operacional, a capacidade nominal dos equipamentos de cais, a razão da quantidade de equipamentos de cais pelo tamanho do cais e a razão da capacidade estática de armazenagem pela área operacional dos terminais foram os fatores de produção conjuntamente mais relevantes para explicar a fronteira estocástica de produção durante o período sob estudo. É estimado o efeito temporal sobre a eficiência dos terminais, que se revela negativo. Por fim, é apresentada ordenação dos terminais de contêineres pelas respectivas eficiências estimadas e discute-se a aplicação do método para o estabelecimento de metas de eficiência e de movimentação.

## **1 INTRODUÇÃO**

As instalações portuárias são elementos cruciais para a dinâmica dos setores relacionados ao comércio exterior brasileiro. Quando se conhecem as vias de transporte, tem-se que mais de 95% em peso das mercadorias exportadas ou importadas no Brasil passam por instalações portuárias (BRASIL, 2019). Assim, a eficiência do setor portuário é um atributo relevante para a logística nacional. Dado seu caráter estratégico, o tema chega a ser apontado como o mais importante para o estudo da economia portuária, como destaca Barros (2006).

Este trabalho propõe-se a estudar a eficiência técnica dos terminais brasileiros de contêineres por meio do método conhecido como análise de fronteira estocástica de produção. Ainda que se tenha observado uma popularização dos estudos sobre a eficiência portuária, especialmente daqueles que aplicam a técnica de análise envoltória de dados (DEA), não se identificou na literatura a ampliação do uso da técnica econométrica para o setor portuário brasileiro. Assim, este trabalho tenta suprir essa lacuna.

O tema ganha pertinência quando se constata que há indicativos de que aparentemente a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (Antaq), entidade reguladora dos agentes que atuam no setor portuário nacional, ainda não estabeleceu metodologia geral para avaliação da eficiência de instalações portuárias. Isso se extrai da leitura dos Acórdãos N° 3661/2013 – TCU – Plenário e N° 2200/2015 – TCU – Plenário, por meio dos quais o Tribunal de Contas da União evidenciou a necessidade de a Antaq constituir mecanismos para embasar a avaliação e o acompanhamento da eficiência dos terminais portuários (BRASIL, 2013, 2015).

Tendo isso em vista, objetiva-se investigar a aplicabilidade da análise de fronteira estocástica para terminais de contêineres, destacando-se as particularidades dos dados disponíveis, os fatores de produção relevantes ao desempenho portuário, suas possibilidades intrinsecamente decorrentes para o estudo da eficiência e suas limitações.

## **2 O MODELO DE FRONTEIRA ESTOCÁSTICA**

O resultado de uma unidade produtiva está relacionado a elementos determinísticos e a fenômenos aleatórios (estocásticos) que incidem sobre essa. A influência de variáveis controláveis e aleatórias implica a aptidão das unidades produtivas em gerar resultados. Entretanto, essa aptidão em originar produtos não é aproveitada completamente pelas unidades produtivas, isto é, a produção não alcança a fronteira de capacidade produtiva. Esse fenômeno decorre, ao menos em parte, da ineficiência das unidades. Tendo isso em vista, o modelo de fronteira estocástica busca estimar o máximo de produção de cada unidade produtiva, dados

seus fatores de produção e efeitos aleatórios incidentes, de forma a tornar possível a comparação entre os valores alcançados pelas unidades e aqueles teoricamente alcançáveis. As diferenças entre essas quantidades são consideradas realizações de variáveis aleatórias que descrevem as ineficiências das unidades produtivas.

## 2.1 Formulação geral

Os elementos determinísticos do modelo conformam uma função de produção para a atividade estudada. São geralmente fatores de produção, como variáveis associadas ao capital e ao trabalho. No entanto, é possível a utilização de fatores associados às condições operacionais das unidades, como indicadores de localização e de conectividade, e também de fatores exógenos, como variáveis relacionadas à demanda (SARRIERA et al. 2013).

Já os componentes aleatórios do modelo são decompostos em dois termos: um associado a fatores externos à unidade produtiva e que impactam os resultados e outro relacionado a sua ineficiência. Enquanto o primeiro termo pode ser positivo ou negativo e determina em conjunto com a função de produção a fronteira estocástica de produção para a unidade, o segundo termo é negativo e representa a distância da unidade produtiva de sua fronteira de produção.

Assim, o modelo de fronteira estocástica em sua formulação<sup>1</sup> dada por Aigner, Lovell e Schmidt (1977) pode ser descrito pela seguinte equação:

$$y_i = f(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta}) + v_i + u_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

onde  $y_i$  é a produção ou resultado da unidade  $i$  e  $\mathbf{x}_i = (x_{1i}, \dots, x_{pi})$  é um vetor de variáveis associadas aos fatores de produção. Os termos aleatórios do modelo são  $v_i$ , que são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas com valor esperado nulo e variância  $\sigma_v$ , e  $u_i$ , que também são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas, mas com  $u_i \leq 0, i = 1, \dots, n$ . Assume-se que os termos aleatórios  $v_i$  e  $u_i$  são independentes entre si. O vetor  $\boldsymbol{\beta} = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)$  contém os parâmetros da função de produção. Já  $f(., .)$  delinea a função de produção propriamente dita, que pode ser apresentada com diversas formas, mas que

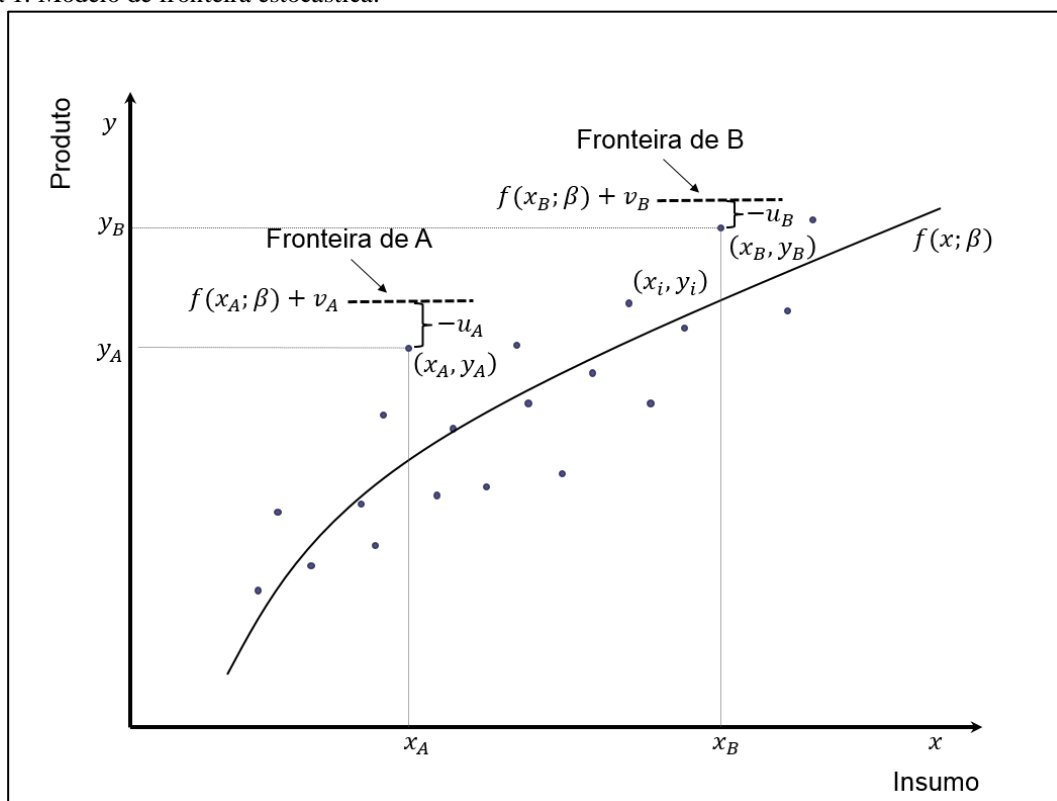
---

<sup>1</sup> O modelo de fronteira estocástica apresentado por Aigner et al. (1977) foi proposto de forma contemporânea e independente por Meeusen e van den Broeck (1977). Neste trabalho optou-se pela exposição do modelo de fronteira estocástica nos termos da forma dada por Aigner et al. (1977).

para fins práticos de estimação deve ser especificada de maneira a permitir sua linearização, ao menos quanto aos parâmetros do modelo.

Segundo Aigner et al. (1977), as características distintas dos dois termos aleatórios  $v_i$  e  $u_i$  são condizentes com a interpretação econômica que baseia o modelo. O termo  $u_i$  representa a distância do resultado  $y_i$  da fronteira estocástica da unidade  $i$ , que é dada por  $f(x_i; \beta) + v_i$ . Esse termo é atribuído à ineficiência da unidade  $i$  e relaciona-se a fatores sob controle dessa, como gerenciamento da planta produtiva, esforço da força de trabalho e manutenção dos equipamentos. Já o termo  $v_i$ , que pode ser positivo ou negativo, contém os efeitos dos fatores externos à unidade  $i$ , como sorte, condições climáticas excepcionais e elementos imprevisíveis dos insumos de produção. Um exemplo de fator aleatório externo relacionado ao setor portuário é a condição de mau tempo que impede momentaneamente a navegação segura no canal de acesso para a atracação de embarcações no cais de um porto. Isso pode causar transtornos de fila de navios e de acúmulo de cargas no pátio, que impactarão negativamente as operações portuárias por um período consideravelmente maior que ao de indisponibilidade do canal de acesso.

Figura 1. Modelo de fronteira estocástica.



Fonte: Elaboração própria.

Outro aspecto do modelo levantado por Aigner et al. (1977) trata de uma implicação da natureza estocástica da fronteira de produção. O fato dessa possuir o termo de ruído aleatório  $v_i$  a torna aleatoriamente distinta entre as unidades produtivas. Ou seja, a fronteira possui valores de distância, para mais ou para menos, de seu componente determinístico  $f(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta})$  que são próprios de cada unidade produtiva. Além disso, a fronteira de produção varia para uma mesma unidade ao longo do tempo, ainda que o vetor  $\mathbf{x}_i$  de variáveis associadas aos fatores de produção permaneça inalterado.

## 2.2 Eficiência a partir da fronteira estocástica

Tendo em vista que  $y_i \leq f(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta}) + v_i$ , uma vez que  $u_i \leq 0$ , a eficiência de uma unidade produtiva  $i$  é dada por

$$e_i = \frac{y_i}{f(\mathbf{x}_i; \boldsymbol{\beta}) + v_i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (2)$$

A forma definida pela Equação 2 permite a comparação da eficiência das unidades produtivas levando-se em conta a posição do componente determinístico em relação ao vetor de fatores ou insumos de produção (AIGNER et al. 1977). Assim, não são observados para a determinação e comparação da eficiência somente os valores das realizações das variáveis aleatórias  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , mas a relação entre o produto alcançado, que é influenciado por  $u_i$ , e o teoricamente alcançável para cada unidade produtiva. Conforme ilustrado na Figura 1, a unidade B não será considerada mais eficiente que a unidade A somente pelo fato de que  $u_A < u_B$ , mas se  $y_B / (f(\mathbf{x}_B; \boldsymbol{\beta}) + v_B)$  for maior que  $y_A / (f(\mathbf{x}_A; \boldsymbol{\beta}) + v_A)$ .

Os estimadores do vetor de parâmetros  $\boldsymbol{\beta}$  e das variâncias  $\sigma_v$  e  $\sigma_u$  podem ser derivados pelos métodos de Máxima Verossimilhança, quando se supõe conhecidas<sup>2</sup> as distribuições de  $v_i$  e  $u_i$ , conforme Aigner et al. (1977) ou de Mínimos Quadrados, conforme Schmidt e Sickles (1984). Os valores individualizados de  $u_i$  podem ser estimados realizando-se computações apropriadas a partir da introdução de variáveis *dummies* indicando cada unidade produtiva e utilizando-se de métodos de Mínimos Quadrados, de acordo com Schmidt e Sickles (1984) ou, ainda, por Máxima Verossimilhança, a partir da transformação deste termo proposta por Battese e Coelli (1995) para permitir a estimação.

---

<sup>2</sup> O trabalho de Aigner, Lovell e Schmidt (1977) atribui distribuição Normal para o termo  $v_i$  e Normal Truncada em  $[-\infty, 0]$  para  $u_i$ .

### 3 OS DADOS

#### 3.1 Terminais selecionados

Foram selecionados para a participar deste estudo os terminais especializados em movimentação de contêineres e aqueles que, ainda que não especializados, movimentaram mais do que 20.000 unidades de contêineres em 2017, de acordo com o Painel Estatístico Aquaviário da Antaq (ANTAQ, 2019). Ao todo foram escolhidas 22 instalações portuárias, contidas ou não em portos organizados<sup>3</sup>, cujos dados cadastrais estão dispostos no Quadro 1.

Quadro 1. Informações cadastrais dos terminais avaliados.

Terminal	Tipo de Terminal	Porto Organizado	Complexo Portuário	UF	Movimentação de contêineres (un.) - 2017
BTP	Arrendado	Santos	Santos	SP	876.233
Santos Brasil	Arrendado	Santos	Santos	SP	821.386
TUP Portonave	Terminal de uso privado	-	Itajaí	SC	507.803
Tecon Rio Grande	Arrendado	Rio Grande	Rio Grande	RS	447.055
TCP	Arrendado	Paranaguá	Paranaguá - Antonina	PR	428.097
TUP DP World Santos	Terminal de uso privado	-	Santos	SP	399.232
TUP Porto Itapoá	Terminal de uso privado	-	São Francisco do Sul	SC	338.535
Tecon Suape	Arrendado	Suape	Suape - Recife	PE	269.911
Libra Santos	Arrendado	Santos	Santos	SP	233.294
Tecon Salvador	Arrendado	Salvador	Aratu - Salvador	BA	190.587
Tecon Sepetiba	Público	Itaguaí	Itaguaí	RJ	168.782
TVV	Arrendado	Vitória	Vitória	ES	153.374
TUP Chibatão	Terminal de uso privado	-	Manaus	AM	151.975
TUP Super Terminais	Terminal de uso privado	-	Manaus	AM	139.784
Terminal Portuário do Pecém	Terminal de uso privado	-	Pecém - Fortaleza	CE	127.140
APM Terminals Itajaí	Arrendado	Itajaí	Itajaí	SC	112.273
Multi-Rio	Arrendado	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro - Niterói	RJ	111.892
Libra-Rio	Arrendado	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro - Niterói	RJ	78.491
Convicon	Público	Vila do Conde	Vila do Conde - Belém	PA	76.770
Fortaleza	Público	Fortaleza	Pecém - Fortaleza	CE	52.534
Tecon Imbituba	Público	Imbituba	Imbituba	SC	39.107
Natal	Público	Natal	Natal	RN	29.413
<b>Total de movimentação de contêineres (un.) Brasil - 2017</b>					5.816.782
<b>Representatividade em movimentação dos terminais selecionados - 2017</b>					98,9%

Fonte: Painel Estatístico Aquaviário da Antaq (ANTAQ, 2019).

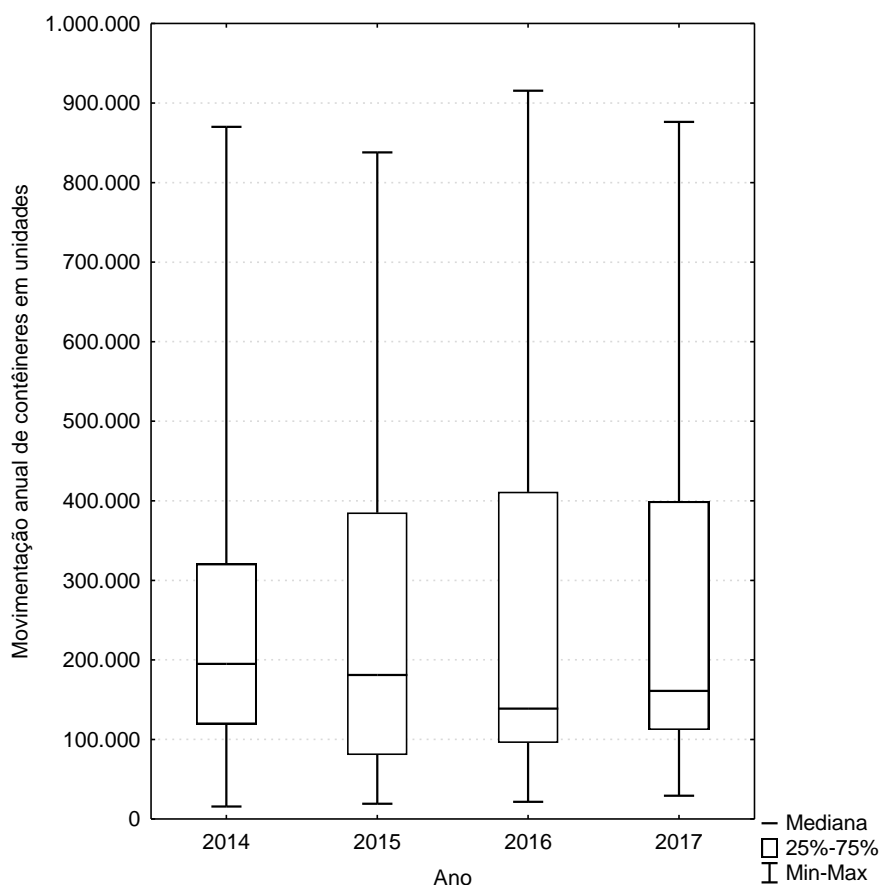
<sup>3</sup> De acordo com a Lei Nº 12.815/2013 um porto organizado é definido como um “*bem público construído e aparelhado para atender a necessidades de navegação, de movimentação de passageiros ou de movimentação e armazenagem de mercadorias, e cujo tráfego e operações portuárias estejam sob jurisdição de autoridade portuária*”, (BRASIL, 2013). Já uma instalação portuária é uma “*instalação localizada dentro ou fora da área do porto organizado e utilizada em movimentação de passageiros, em movimentação ou armazenagem de mercadorias, destinadas ou provenientes de transporte aquaviário*”, (BRASIL, 2013). Neste texto considera-se como terminal portuário a instalação portuária que possui cais vinculado ou prioridade de operação em cais público.



### 3.2 Medida de produção

A medida alvo de produção para este estudo de eficiência é a quantidade anual de contêineres movimentados pelos terminais, durante os anos de 2014 a 2017. Essa medida é diferente da utilizada por Sarriera et al. (2013) para a avaliação da eficiência de portos selecionados da América Latina e do Caribe. Esses autores utilizaram a quantidade de contêineres em TEUs<sup>4</sup> como medida de produção. Entretanto, a quantidade de contêineres em unidades, utilizada neste trabalho, se alinha ao objetivo de se obter medidas de eficiência associadas a quantidades de simples observação, que não necessitam de cálculos adicionais de equivalência que exigiriam o conhecimento do modelo exato dos contêineres movimentados para a sua computação. A medida de produção escolhida para esse trabalho pode ser aferida pela simples contagem.

Figura 2. *Box-plots* da movimentação anual de contêineres dos terminais selecionados em unidades por ano.



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Painel Estatístico Aquaviário da Antaq (ANTAQ, 2019).

<sup>4</sup> TEU, sigla de *Twenty-foot Equivalent Unit*, é uma medida de volume que equivale ao volume de um contêiner convencional de 20 pés, que é de aproximadamente 39m<sup>3</sup>.

A movimentação realizada pelos 22 terminais apresenta distribuição bastante assimétrica. Enquanto a mediana da quantidade de contêineres fica abaixo de 200.000 unidades para os anos em estudo, o valor máximo movimentado por um terminal ultrapassa 800.000 unidades por ano, conforme análise possível da Figura 2. Além disso, também por meio da Figura 2, observa-se que os terminais contidos no primeiro quartil de quantidade de contêineres movimentaram por ano no máximo algo não muito superior a 100.000 unidades, já os terminais pertencentes ao último quartil movimentaram algo entre 400.000 e 900.000 unidades por ano, evidenciando-se outra vez a assimetria da distribuição de movimentação entre os terminais.

### 3.3 Fatores de produção

As variáveis explicativas selecionadas inicialmente para o modelo estão apresentadas no Quadro 2. São variáveis associadas aos fatores físicos de produção. Ou seja, estão relacionadas a elementos da infraestrutura e da superestrutura presentes nos terminais. Dessa forma, tendo em vista que a medida de produção escolhida também é física e não financeira ou contábil, conclui-se que da Equação 2 será possível estimar a eficiência técnica dos terminais e não a eficiência alocativa ou econômica dessas instalações.

Os fatores de produção elencados no Quadro 2 coincidem em boa parte com aqueles utilizados por Sarriera et al. (2013). Mais especificamente, tem-se que  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_8$ ,  $x_{10}$ ,  $x_{15}$  e  $x_{18}$  foram empregados, ainda que com pequenas alterações conceituais, ao menos na tentativa inicial de ajuste do modelo proposto por Sarriera et al. (2013). No entanto, o intuito do trabalho citado foi estudar a eficiência dos portos como conjuntos de instalações portuárias e o presente trabalho se propõe a estimar a eficiência de instalações portuárias que estão nos portos. Isso implica níveis de agregação diversos entre os trabalhos.

Há dentre as variáveis selecionadas aquelas mais associadas ao capital e outras relacionadas ao trabalho, da forma identificada por Gonzáles e Trujillo (2009) em levantamento de estudos sobre eficiência portuária. As variáveis próximas ao capital são as que caracterizam a infraestrutura dos terminais, ou seja,  $x_1$  até  $x_5$  (SARRIERA et al., 2013). Também de acordo com Sarriera et al. (2013), o trabalho é representado pelo maquinário para serviços portuários de movimentação de cargas entre as embarcações e o cais presentes nos terminais, aqui medido por meio das variáveis  $x_8$  até  $x_{11}$ . Já as variáveis  $x_6$ ,  $x_7$  e  $x_{12}$  refletem balizas operacionais para os terminais. O conjunto de variáveis citado até aqui tem como fonte levantamento realizado pela Antaq em estudo em andamento sobre eficiência portuária, que está relacionado a um

projeto maior sobre indicadores de desempenho portuário, constante do processo eletrônico 50300.005994/2017-09-Antaq (ANTAQ, em andamento).

Adicionalmente às variáveis discutidas até aqui, foram derivadas dessas as variáveis  $x_{13}$  até  $x_{18}$ . Essas construções foram necessárias para mitigar os possíveis efeitos de multicolinearidade entre as variáveis originais, a exemplo da correlação negativa esperada entre  $x_8$  e  $x_{10}$ , mas positiva entre a soma dessas e  $x_2$ . Outro exemplo disso se dá pela correlação positiva esperada entre  $x_1$  e  $x_{12}$ . Essas correlações foram confirmadas na Tabela 1 à diante. Por outro lado, buscou-se arquitetar fatores que fizessem sentido quanto ao aproveitamento da infraestrutura e da superestrutura dos terminais para a resposta em serviços portuários, a exemplo de  $x_{17}$ . A variável  $x_{18}$  foi construída para distinguir o grau de especialização dos terminais em estudo pela identificação da presença de equipamentos exclusivamente dedicados a operações com contêineres.

O período observado para as variáveis explicativas compreendeu os anos de 2014 a 2017, de modo igual à variável dependente. As medições referem-se sempre ao estado dos terminais ao término do ano de referência. Dessa forma, tem-se um conjunto de dados em painel dos terminais portuários selecionados para esse trabalho. Os dados das variáveis explicativas estão representados na Figura 3, que exibe medidas das distribuições dos fatores entre os terminais ao longo dos anos sob estudo.

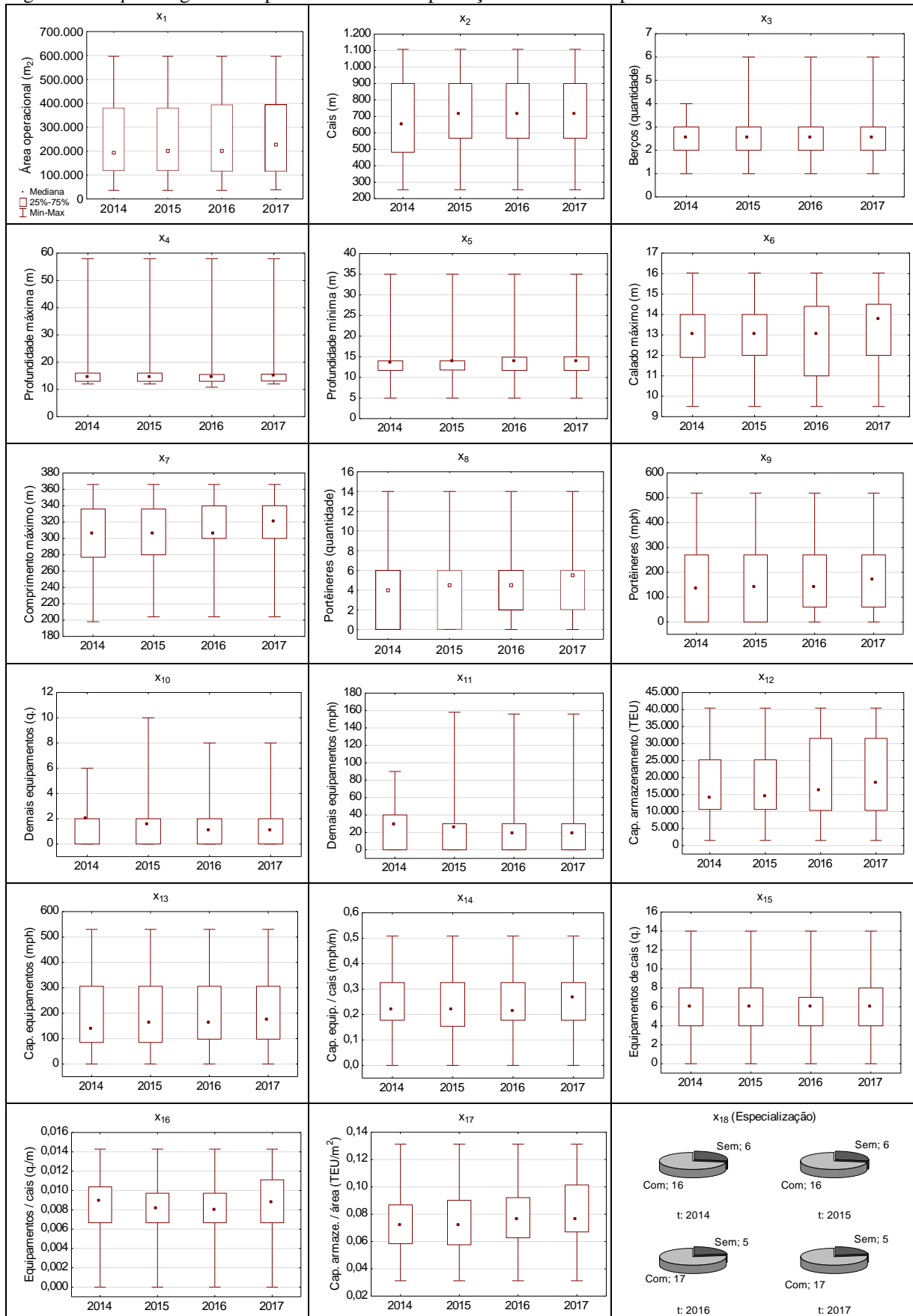
Os dados das variáveis explicativas passaram por tratamento para eliminação de valores discrepantes ou, ainda, para inserção de faltantes. Os casos identificados como discrepantes relacionam-se a erros de medição das variáveis. Também podem ser decorrentes de interpretação equivocada dos formulários preenchidos por representantes dos terminais para o levantamento original dos dados. Como exemplo disso, notou-se que os dados originais que seriam de capacidade estática de armazenamento ( $x_{12}$ ) de um terminal aparentemente referiam-se à capacidade de armazenamento anual do terminal, considerando o giro da carga. Nesse caso foi usada regressão simples de  $x_{12}$  com a área operacional dos terminais ( $x_1$ ) para estimar e substituir os valores de capacidade estática de armazenamento desse terminal. Outro caso refere-se ao calado máximo das embarcações autorizadas atribuído a um terminal, que mostrou-se consideravelmente superior ao do maior navio contêiner já construído, o OOCL Hong Kong (TOP, 2019), com 16,03 metros de calado (ORIENT, 2019). Para tratar essa situação, foi considerado o calado do OOCL Hong Kong como o valor de  $x_6$  para o terminal em questão.

Quadro 2. Variáveis explicativas (fatores de produção) selecionadas inicialmente para o estudo.

Designação no modelo	Nome da variável	Definição
$x_1$	Área operacional	Área total do terminal em metros quadrados (m <sup>2</sup> ) destinada a operações portuárias e efetivamente implantada até o término do ano de referência.
$x_2$	Cais	Soma do comprimento em metros (m) do(s) cais destinado(s) a operações portuárias do terminal efetivamente implantado até o término do ano de referência.
$x_3$	Berços	Quantidade de segmentos do cais cujos espaços são ocupados e destinados à operação de navios.
$x_4$	Profundidade máxima do cais	Medida, em metros (m), da distância vertical entre a linha d'água e o fundo do mar, tomada no local mais profundo para atracação do terminal, ao fim do ano de referência.
$x_5$	Profundidade mínima do cais	Medida, em metros (m), da distância vertical entre a linha d'água e o fundo do mar, tomada no local menos profundo para atracação do terminal, ao fim do ano de referência.
$x_6$	Calado máximo	Calado máximo permitido em metros (m) ao término do ano de referência para os navios acessarem o terminal em qualquer situação de maré, levando-se em conta a profundidade do canal de acesso e do cais para atracação.
$x_7$	Comprimento máximo	Comprimento máximo permitido em metros (m) ao fim do ano de referência para os navios atracarem no terminal.
$x_8$	Portêineires	Quantidade de guindastes portuários pórticos sobre trilhos especializados em movimentação de contêineres do tipo STS em operação no terminal ao fim do ano de referência.
$x_9$	Capacidade nominal dos portêineires	Soma da capacidade de movimentação de contêineres dos portêineires do terminal, medida em movimentos por hora (mph), em condições operacionais ótimas, ao término do ano de referência.
$x_{10}$	Demais guindastes de cais	Quantidade de guindastes portuários de cais utilizados para movimentação de contêineres, exceto portêineires, em operação no terminal ao fim do ano de referência.
$x_{11}$	Capacidade nominal dos demais guindastes de cais	Soma da capacidade de movimentação de contêineres dos guindastes portuários de cais do terminal, exceto portêineires, medida em movimentos por hora (mph), em condições operacionais ótimas, ao término do ano de referência.
$x_{12}$	Capacidade estática de armazenamento de contêineres	Quantidade máxima de contêineres medida em TEUs passíveis de armazenamento simultâneo no terminal ao fim do ano de referência.
$x_{13}$	Capacidade nominal dos equipamentos de cais ( $x_9 + x_{11}$ )	Soma da capacidade de movimentação de contêineres de todos os equipamentos de cais, medida em movimentos por hora (mph), em condições operacionais ótimas, ao término do ano de referência.
$x_{14}$	Capacidade dos equipamentos pelo tamanho do cais ( $x_{13}/x_2$ )	Razão entre as variáveis $x_{13}$ e $x_2$ .
$x_{15}$	Quantidade de equipamentos de cais ( $x_8 + x_{10}$ )	Soma das variáveis $x_8$ e $x_{10}$ .
$x_{16}$	Quantidade dos equipamentos pelo tamanho do cais ( $x_{15}/x_2$ )	Razão entre as variáveis $x_{15}$ e $x_2$ .
$x_{17}$	Capacidade estática de armazenamento pela área operacional ( $x_{12}/x_1$ )	Razão entre as variáveis $x_{12}$ e $x_1$ .
$x_{18}$	Especialização ( $I_{(x_8 > 0)}$ )	Variável indicadora da presença de equipamentos de cais especializados para movimentação de contêineres (portêineires) no terminal (quando $x_8 > 0$ ).

Fonte: Elaboração própria a partir de informações do processo 50300.005994/2017-09-Antaq (ANTAQ, em andamento).

Figura 3. Box-plots e gráfico de pizza dos fatores de produção dos terminais por ano.



Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, adotou-se o seguinte procedimento para o tratamento de valores discrepantes ou faltantes identificados por inspeção: busca em fontes oficiais como os Planos de Desenvolvimento e Zoneamento<sup>5</sup> e Planos Mestres<sup>6</sup> dos portos organizados (isso resolveu um caso de um cais público estranhamente longo); substituição por estimativas de regressão a partir de outras variáveis independentes (utilizada no caso já citado sobre a capacidade de armazenamento); substituição por estimativas a partir da média dos demais terminais para a variável em questão (resolveu um caso sobre a capacidade nominal dos portêineiros de um terminal); busca em outras fontes por valor alternativo (empregada no caso já citado do calado do OOCL Hong Kong).

## 4 ESTIMAÇÃO DO MODELO

### 4.1 Especificação do modelo.

A especificação do modelo a ser estimado, levando-se em conta a formulação geral dada pela Equação 1 e o fato de que os dados estão em painel, pode ser descrita pela equação que segue:

$$\log y_{it} = \beta_0 + \sum_{m=1}^{17} \beta_j \log x_{mit} + \beta_{18} x_{18it} + \beta_{19} t + v_{it} + u_{it} , \quad (3)$$

para  $i = 1, \dots, 22$  e  $t = 2014, \dots, 2017$ .

A forma funcional adotada na Equação 3 é derivada do modelo proposto por Battese e Coelli (1995) para a análise de fronteira de produção para dados em painel e foi aplicada por SARRIERA et al. (2013) para o setor portuário. É semelhante ao modelo *translog* sugerido por Estache, González e Trujillo (2002), mas sem os termos multiplicativos do tipo  $\log x_{kit} \log x_{lit}$ . A escolha de não se utilizar esses termos decorreu da implicação sobre os graus de liberdade para a estimação do modelo, tendo em vista a grande quantidade de parâmetros adicionais que necessitariam de testes estatísticos se essa opção fosse adotada.

O termo aleatório de ineficiência  $u_{it}$  presente na Equação 3 para o modelo de fronteira estocástica aplicável a dados em painel é definido pela Equação 4 que segue:

$$u_{it} = \delta_0 + \delta_1 t + w_{it} , \quad (4)$$

onde  $w_{it}$  é uma variável aleatória com distribuição resultante do truncamento no ponto  $\delta_0 + \delta_1 t$  de uma distribuição Normal média 0, de tal forma que  $w_{it} \leq \delta_0 + \delta_1 t$ , de acordo com a

<sup>5</sup> Disponíveis em <<http://www.transportes.gov.br/editoria-c/89-portos-menu-lateral/5428-plano-de-desenvolvimento-e-zoneamento-pdz.html>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

<sup>6</sup> Disponíveis em <<http://www.transportes.gov.br/auditoria/89-portos-menu-lateral/5426-planos-mestres-vers%C3%A3o-completa.html>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

formulação proposta no trabalho de Battesi e Coelli (1995). Essa construção permite a avaliação do efeito temporal sobre os termos de ineficiência. Entretanto, difere-se do modelo proposto por Aigner et al. (1977), uma vez que  $u_{it}$  não será necessariamente negativo (BATTESE e COELLI, 1995).

O ajuste do modelo foi realizado pelos estimadores de Máxima Verossimilhança dos parâmetros, da forma derivada por Battesi e Coelli (1995). Para a produção de estimativas utilizou-se o pacote FRONTIER, versão 1.1-2, elaborado por Coelli e Henningsen (2013) e disponível para o ambiente computacional livre R. Mais precisamente, a função  $sfa(.)$  desse pacote foi usada para os ajustes. Vale mencionar que há pelo menos mais outro pacote para R capaz de realizar a estimação de modelos de fronteira estocástica, o BENCHMARKING, conforme indicado por Bogetoft e Otto (2011), de autoria dos mesmos.

Tabela 1. Matriz<sup>7</sup> de correlação das variáveis do modelo geral, obtida independentemente do ano da medição.

Var.	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	x <sub>7</sub>	x <sub>8</sub>	x <sub>9</sub>	x <sub>10</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>12</sub>	x <sub>13</sub>	x <sub>14</sub>	x <sub>15</sub>	x <sub>16</sub>	x <sub>17</sub>	
x <sub>1</sub>	0,66*																		
x <sub>2</sub>	0,57*	0,55*																	
x <sub>3</sub>	0,22*	0,46*	0,56*																
x <sub>4</sub>	-0,11	0,03	-0,28*	0,38*															
x <sub>5</sub>	-0,06	-0,08	-0,38*	-0,10	0,81*														
x <sub>6</sub>	0,01	0,12	-0,08	-0,29*	0,28*	0,54*													
x <sub>7</sub>	0,57*	0,47*	0,53*	0,04	-0,09	0,06	0,38*												
x <sub>8</sub>	0,76*	0,48*	0,71*	0,10	-0,35*	-0,19	0,08	0,67*											
x <sub>9</sub>	0,64*	0,38*	0,73*	0,14	-0,34*	-0,19	0,01	0,62*	0,91*										
x <sub>10</sub>	-0,26*	0,04	-0,29*	0,43*	0,69*	0,37*	-0,13	-0,16	-0,51*	-0,48*									
x <sub>11</sub>	-0,20	0,16	-0,22*	0,47*	0,57*	0,24*	-0,18	-0,06	-0,41*	-0,35*	0,94*								
x <sub>12</sub>	0,68*	0,80*	0,70*	0,46*	-0,09	-0,21	-0,04	0,43*	0,52*	0,41*	-0,05	0,03							
x <sub>13</sub>	0,64*	0,44*	0,72*	0,26*	-0,23*	-0,15	-0,03	0,64*	0,87*	0,98*	-0,30*	-0,15	0,45*						
x <sub>14</sub>	0,56*	0,39*	0,49*	0,10	-0,20	-0,09	-0,01	0,64*	0,80*	0,90*	-0,24*	-0,06	0,33*	0,94*					
x <sub>15</sub>	0,73*	0,59*	0,66*	0,36*	-0,02	-0,01	0,02	0,69*	0,87*	0,78*	-0,02	0,06	0,57*	0,85*	0,79*				
x <sub>16</sub>	0,47*	0,33*	0,06	0,06	0,28*	0,33*	0,08	0,46*	0,51*	0,40*	0,29*	0,31*	0,22*	0,49*	0,62*	0,76*			
x <sub>17</sub>	0,15	-0,12	0,35*	0,04	-0,12	-0,13	-0,10	0,19	0,22*	0,19	-0,16	-0,18	0,44*	0,16	0,12	0,16	0,02		
x <sub>18</sub>	0,42*	0,19	0,45*	-0,19	-0,50*	-0,25*	0,07	0,69*	0,69*	0,64*	-0,48*	-0,40*	0,21	0,58*	0,64*	0,53*	0,34*	0,19	

\* Significante ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

Fonte: Elaboração própria.

## 4.2 Seleção de variáveis

O modelo final ajustado não necessariamente precisa utilizar todos os termos constantes do modelo descrito pela Equação 3. O processo de ajuste aponta as evidências de insignificância estatística de parâmetros, cujas variáveis associadas podem ser retiradas da

<sup>7</sup> Os valores da diagonal principal (todos 1) e das entradas acima dessa foram omitidos pelo caráter não informativo desses, dada a estrutura simétrica da matriz.

análise. Sobre isso, é importante observar os efeitos negativos da multicolinearidade entre as variáveis explicativas para a estimação do modelo. De fato, a matriz de correlação apresentada na Tabela 1 mostra que os fatores de produção escolhidos são, em sua maior parte<sup>8</sup>, estatisticamente associados.

Assim, além da significância dos parâmetros propriamente dita, tornou-se necessário inspecionar se as estimativas para esses faziam sentido para a explicação da variável dependente. A princípio, tendo em vista a natureza dos fatores de produção selecionados, os parâmetros associados às variáveis explicativas deveriam possuir sinal positivo. As estimativas com sinal negativo foram ensejo para atenção. Diante do fenômeno, foi verificado se houve motivo plausível para os fatores relacionados interferirem negativamente sobre a movimentação portuária ou, de forma excludente, se foi apenas efeito da presença de multicolinearidade. Constatado esse último caso, o modelo sob ajuste foi revisto por meio da retirada de ao menos uma variável, ainda que o parâmetro associado a essa apresentasse-se significativo.

Tendo isso em vista, o processo de estimação implicou testes sobre uma grande quantidade de modelos, que foram construídos por meio de subconjuntos das variáveis explicativas. Empregou-se para isso um procedimento assemelhado à técnica de seleção de variáveis para modelos de regressão conhecida como *stepwise backward*. O processo de ajuste iniciou-se com o conjunto completo de variáveis explicativas e verificou-se a cada etapa se a retirada da variável cujo parâmetro mostrou-se menos significativo<sup>9</sup> resultou em melhoria do ajuste do modelo e da significância dos parâmetros das variáveis restantes. Ao mesmo tempo, buscou-se testar os efeitos sobre o ajuste do modelo da retirada das variáveis com estimativas de parâmetros com sinal algébrico negativo. Em alguns casos, o subconjunto de variáveis explicativas apresentou multicolinearidade perfeita ou tão forte a ponto de não haver convergência do algoritmo para obtenção de estimativas. Quando isso ocorreu, o modelo associado a esse subconjunto foi descartado e voltou-se ao modelo anterior, para que a partir desse fosse buscado subconjunto alternativo.

### 4.3 Ajuste do modelo final

De toda sorte, do processo iterativo de escolha de variáveis restou selecionado o modelo cujos parâmetros estão descritos na Tabela 2 à frente.

---

<sup>8</sup> Das 153 correlações possíveis entre as variáveis explicativas, contidas na Tabela 1, 94 são estatisticamente significantes ao nível de significância  $\alpha = 0,05$ .

<sup>9</sup> Por “menos significativo” entende-se aquele que possui maior p-valor em teste *t-Student*.



Tabela 2. Avaliação dos parâmetros selecionados para o modelo final.

Parâmetro	Estimativa	Desvio Padrão	z-valor	$P(Z >  z )$
Intercepto	9,442	1,905	4,957	7,16E-07
$\beta_1$	0,488	0,154	3,168	0,001533
$\beta_{13}$	0,446	0,140	3,182	0,001461
$\beta_{16}$	0,662	0,249	2,660	0,007823
$\beta_{17}$	0,679	0,255	2,669	0,007620
$\sigma^2$	0,766	0,264	2,900	0,003738
$\gamma$	0,907	0,037	24,532	<2,20E-16
Efeito temporal	-0,071	0,038	-1,871	0,061421

Fonte: Elaboração própria a partir da saída do comando `>coef(summary(sfa(.)))` do pacote FRONTIER (COELLI e HENNINGSEN, 2013).

O subconjunto de variáveis explicativas que significativamente mais bem explicaram a fronteira de movimentação portuária dos terminais brasileiros de contêineres durante os anos de 2014 a 2017 é formado por  $x_1$ ,  $x_{13}$ ,  $x_{16}$  e  $x_{17}$ , além do efeito temporal sobre a fronteira de produção e do termo de ineficiência. A Tabela 3 apresenta um resumo sobre as variáveis envolvidas no modelo final ajustado.

Tabela 3. Fatores de produção selecionados para o modelo final da fronteira de movimentação portuária.

Variável	Descrição
$x_1$	Área operacional (m <sup>2</sup> ).
$x_{13}$	Soma da capacidade nominal dos equipamentos de cais (mph*).
$x_{16}$	Quantidade de equipamentos de cais pelo tamanho do cais (q./m).
$x_{17}$	Capacidade estática de armazenagem pela área operacional (TEU/m <sup>2</sup> ).

\*mph: Quantidade de movimentos dos guindastes portuários entre a embarcação e o cais em uma hora de operação.

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, o modelo final para a fronteira estocástica de movimentação portuária continua a utilizar em seu componente determinístico (função de produção) elementos associados ao capital e ao trabalho, comuns aos modelos econômicos para a produção, a exemplo do modelo de Cobb-Douglas. Por meio dessa categorização, a área operacional ( $x_1$ ) dos terminais representa o capital e a capacidade dos equipamentos ( $x_{13}$ ) o trabalho. Já a razão entre quantidade de equipamentos e o tamanho do cais ( $x_{16}$ ) e a razão da capacidade estática de armazenamento pela área operacional são fatores que misturam essas duas categorias e indicam o aproveitamento da infraestrutura e a aptidão para a realização dos serviços portuários pelos terminais.

Os parâmetros  $\sigma^2$  e  $\gamma$  apresentados na Tabela 2 são decorrentes de transformações das variâncias  $\sigma_v^2$  e  $\sigma_u^2$ . Isso é feito para viabilizar a estimação. Essas transformações são definidas

por  $\sigma^2 = \sigma_v^2 + \sigma_u^2$  e  $\gamma = \sigma_u^2 / (\sigma_v^2 + \sigma_u^2)$ , conforme Battese e Corra (1977 apud ESTACHE et al., 2002).

#### 4.4 Eficiência dos terminais de contêineres

A partir do modelo final ajustado para a fronteira estocástica de movimentação é possível estimar as eficiências dos terminais de contêineres sob estudo.

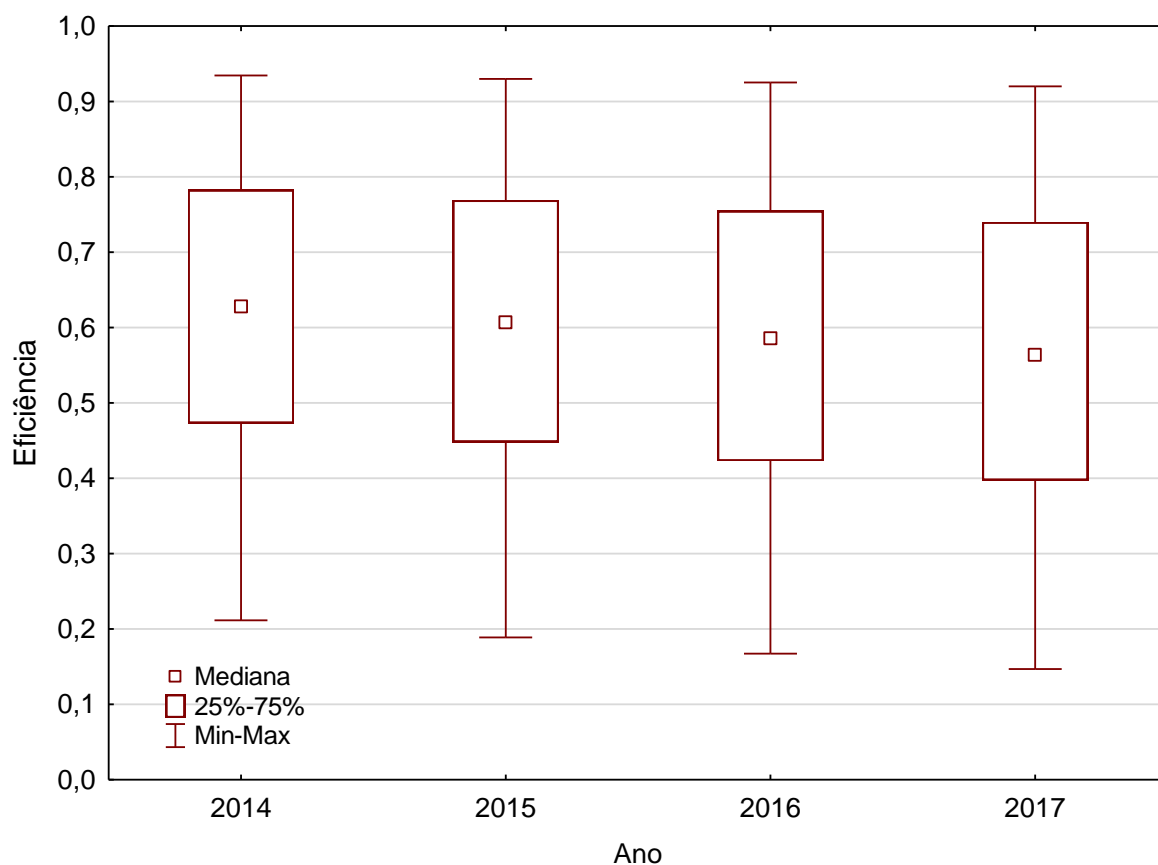
Tabela 4. Eficiência média dos terminais de contêineres, 2014 a 2017.

Ano	2014	2015	2016	2017
Eficiência média	0.621	0.602	0.583	0.564

Fonte: Elaboração própria a partir da saída do comando >summary(sfa(.)) do pacote FRONTIER (COELLI e HENNINGSEN, 2013).

Como esperado, a eficiência dos terminais diminuiu no período, como se observa na Tabela 4, tendo em vista que o efeito estimado da passagem do tempo apresentou-se negativo, mostrado na Tabela 2.

Figura 4. Box-plots das eficiências dos terminais selecionados por ano.



Fonte: Elaboração própria.

Levando-se em conta a interpretação do relacionamento entre a fronteira estocástica e a eficiência dada pela Equação 2, tem-se que a movimentação dos terminais selecionados poderia ser 61% maior em 2014, se não houvesse presença de ineficiência. Já em 2017, a movimentação poderia alcançar um valor 77% maior que de fato foi, se a fronteira de produção fosse atingida. Isso ilustra o efeito temporal estimado sobre o distanciamento da fronteira estocástica. As distribuições das eficiências estimadas para os terminais estão representadas na Figura 4, que exhibe medidas dessas distribuições ao longo dos anos sob estudo.

As eficiências individuais dos terminais de contêineres sob estudo para o período de 2014 a 2017 são apresentadas na Tabela 5. Da forma como são obtidas as eficiências, o método de fronteira estocástica permite a elaboração de ordenações dos terminais de contêineres pelo nível de eficiência técnica, dadas as escolhas inerentes ao modelo, o que permite a identificação de *benchmarks*.

Tabela 5. *Ranking* de eficiência dos terminais de contêineres para 2014 a 2017.

Terminal	2014	2015	2016	2017
TUP Porto Itapoá	0,934	0,930	0,925	0,920
BTP	0,934	0,929	0,924	0,919
TUP Portonave	0,868	0,859	0,850	0,840
TVV	0,810	0,798	0,785	0,772
Santos Brasil	0,797	0,784	0,771	0,756
Convicon	0,783	0,769	0,755	0,740
Tecon Rio Grande	0,782	0,768	0,754	0,739
TUP DP World Santos	0,747	0,732	0,716	0,699
APM Terminals Itajaí	0,719	0,703	0,685	0,667
Tecon Suape	0,650	0,630	0,609	0,588
TUP Super Terminais	0,628	0,607	0,585	0,563
Tecon Salvador	0,581	0,559	0,536	0,513
Fortaleza	0,554	0,531	0,507	0,483
Terminal Portuário do Pecém	0,532	0,508	0,484	0,459
TUP Chibatão	0,517	0,493	0,469	0,444
Tecon Sepetiba	0,473	0,448	0,423	0,397
TCP	0,428	0,402	0,376	0,351
Libra Santos	0,377	0,351	0,326	0,300
Multi-Rio	0,370	0,344	0,318	0,293
Libra-Rio	0,337	0,311	0,286	0,261
Tecon Imbituba	0,211	0,189	0,167	0,147
Natal*	-	-	-	-

\* Natal foi excluído da análise por não ser possível calcular  $\log x_{13it}$  e  $\log x_{16it}$ , pois não possui equipamentos de cais.

Fonte: Elaboração própria a partir da saída do comando >efficiencies (sfa(.)) do pacote FRONTIER (COELLI e HENNINGSEN, 2013).

Como se observa na Equação 3, o modelo é linearizado por meio da aplicação de logaritmos tanto no lado da variável resposta quanto no lado das explicativas. Isso implica a necessidade de exclusão no modelo das observações das variáveis explicativas que sejam iguais a zero.

Isso ocorreu no caso do Porto de Natal, cujo cais público destinado à movimentação de contêineres não possui equipamentos dedicados às operações desse tipo de carga. Desse modo, não é possível calcular  $\log x_{13it}$  e  $\log x_{16it}$ , que envolvem a capacidade e a quantidade dos equipamentos de cais, respectivamente. Assim, Natal foi excluído da análise de eficiência.

Entretanto, o prejuízo dessa limitação para a aplicação do modelo pode ser relativizado nesse caso. Uma vez que não possui equipamentos de cais, é possível afirmar que o terminal do Porto de Natal opera com tecnologia diversa dos demais. Diferentemente dos outros, as operações de carregamento e descarregamento de contêineres são exclusivamente realizadas por meio de guindastes das próprias embarcações atracadas. Por isso, seria admissível defender a exclusão de Natal do *ranking* apresentado na Tabela 5, ainda que fosse possível calcular as eficiências desse, se outras variáveis explicativas fossem selecionadas.

#### 4.5 Discussão acerca da aplicação do modelo para a avaliação de terminais

Além da estimação da eficiência individual e da possibilidade de estabelecimento de *rankings*, como apontado na Tabela 5, o modelo de fronteira estocástica pode ser aplicado a outros fins relacionados à avaliação de terminais.

Uma possível aplicação está na estimação prévia da fronteira de movimentação de novos terminais a partir da obtenção dos valores das variáveis explicativas dos projetos ou estudos de viabilidade desses. Em decorrência disso, também se mostra possível estimar qual será a eficiência esperada para um novo terminal, uma vez que os estudos de viabilidade costumam contemplar previsões da movimentação. Essas aplicações também são admissíveis para alterações de configuração, avaliação dos efeitos de investimentos ou ampliações de terminais existentes. Entretanto, para possibilitar esses usos é necessário especificar e ajustar o modelo sem levar em consideração o efeito temporal<sup>10</sup>.

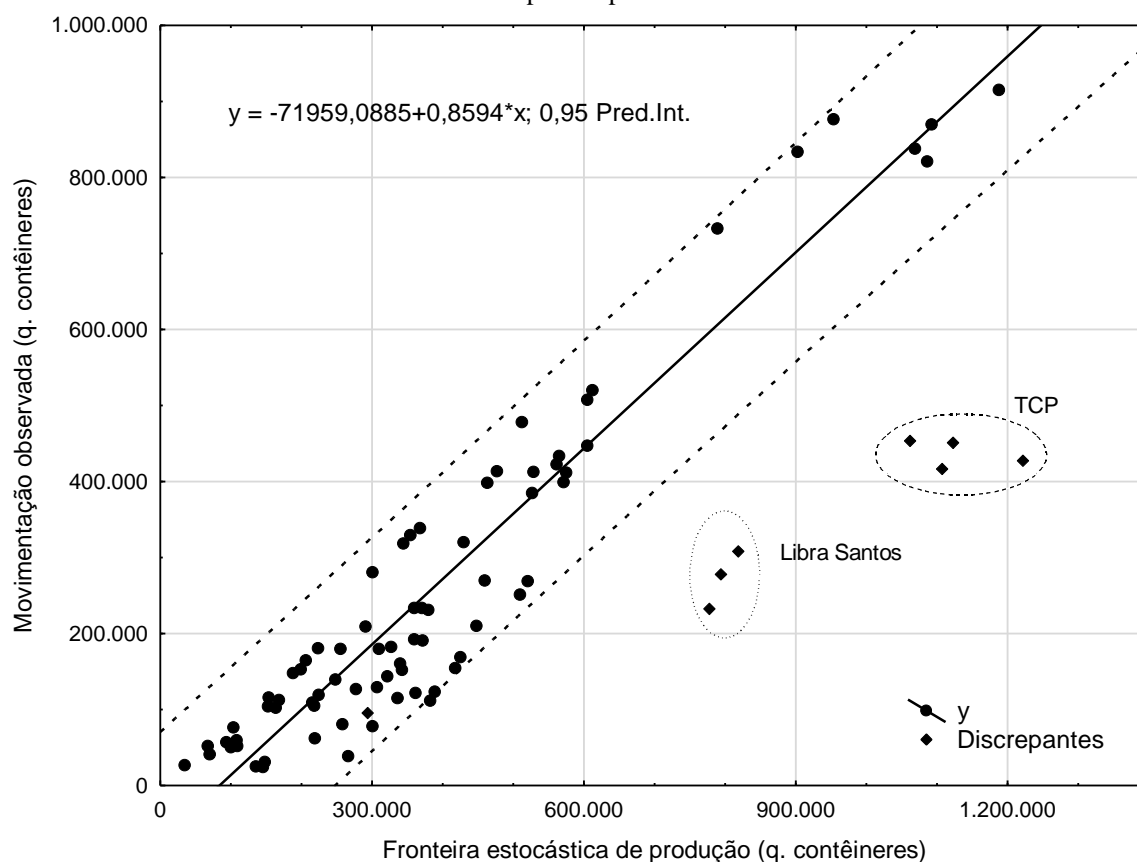
O ajuste da fronteira de produção pode ser utilizado para o estabelecimento de metas estatisticamente justificáveis de movimentação para as instalações portuárias. Uma forma de se fazer isso está relacionada com a estimação da variabilidade associada ao próprio processo de

---

<sup>10</sup> O ajuste do modelo sem efeito temporal, considerando as medições anuais como replicações, possui as seguintes estimativas: intercepto = 10,057,  $\beta_1 = 0,497$ ,  $\beta_{13} = 0,425$ ,  $\beta_{16} = 0,739$  e  $\beta_{17} = 0,787$ , significantes ao nível 0,05.

obtenção da fronteira. Se estimado o erro padrão para a fronteira é possível a construção de intervalos ou bandas com a probabilidade controlada de que os valores individuais da movimentação portuária caiam a determinadas distâncias da fronteira. Dessa forma, é possível que sejam estabelecidas metas obtidas, por exemplo, pelo valor da fronteira de produção e pela multiplicação de um fator associado ao erro-padrão do estimador da fronteira. Tendo em vista às dificuldades analíticas envolvidas, métodos numéricos, tais como *bootstrap* e suas variantes, podem ser empregados para a construção desses intervalos.

Figura 5. Dispersão, regressão e bandas para previsões individuais da movimentação de contêineres dos terminais pela respectiva fronteira.



Fonte: Elaboração própria.

De forma mais empírica, é possível empregar a Equação 2 e as eficiências individuais estimadas para, diante do modelo já ajustado, a obtenção da fronteira para cada observação da variável resposta. A partir disso, viabiliza-se a construção de modelos de regressão para o acompanhamento do desempenho dos terminais. Quando se incluem bandas com probabilidade controlada de que futuras observações da movimentação portuária não se distanciem até um limite de sua fronteira, é possível verificar o desempenho das instalações.

Um exemplo dessa construção está apresentado na Figura 5, que descreve a dispersão da movimentação de contêineres dos terminais pela respectiva fronteira, obtida por meio do modelo a que se referem as Tabela 2 e 3. A Figura 5 também mostra a reta de regressão entre a movimentação portuária observada e sua fronteira calculada. Além disso, contém os intervalos de 95% de confiança, calculados por meio dos erros de previsão para observações individuais. Esses intervalos conformam bandas entorno da reta de regressão, que podem ser utilizadas para o acompanhamento de novas observações da variável dependente.

Para a construção do modelo de regressão exposto na Figura 5, os valores de movimentação e da fronteira para os terminais TCP e Libra Santos foram desprezados pelo desvio elevado em relação aos demais terminais. Ou seja, foram considerados discrepantes.

Uma possível crítica ao modelo empírico descrito na Figura 5 se dá pelo fato de a regressão da movimentação pela respectiva fronteira ser neutra em relação à eficiência dos terminais. Em outras palavras, o estado em que fora medida a eficiência, sem levar em consideração se essa alta ou baixa, é empregado para as futuras comparações.

## **5 CONCLUSÕES**

O método de análise da fronteira estocástica de produção mostrou-se aplicável à determinação da eficiência dos terminais de contêineres brasileiros. Isso, pois, por meio dos dados de infraestrutura, superestrutura e desempenho dos terminais, foi possível construir um modelo com parâmetros estatisticamente significativos para a fronteira de movimentação de contêineres.

A área operacional, a capacidade nominal dos equipamentos de cais, a razão da quantidade de equipamentos de cais pelo tamanho do cais e a razão da capacidade estática de armazenagem pela área operacional dos terminais mostraram-se conjuntamente como os mais relevantes fatores de produção para explicar a fronteira de movimentação dos terminais de contêineres. De outro modo, o aproveitamento racional desses fatores revelou-se determinante para as estimativas de eficiência dos terminais.

A obtenção de uma equação com parâmetros estatisticamente significativos é uma vantagem da utilização do método de fronteira estocástica frente a outros para a medição de eficiência, como o DEA. Essa equação pode ser empregada para a avaliação de projetos de novos terminais ou alterações nos existentes. Além disso, a partir da relação intrínseca da eficiência com a fronteira de produção, é possível o desenvolvimento de modelos para a

construção de metas de movimentação e de eficiência, bem como para o acompanhamento do desempenho de terminais de contêineres.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, **Painel Estatístico Aquaviário**, 2019. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/Anuario/>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, **Processo 50300.005994/2017-09-Antaq**, em andamento. Disponível em: <[http://sei.antaq.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md\\_pesq\\_processo\\_exibir.php?wt7h6hFBI\\_9S3DJjGLl0dpQiiSEQL4RcICP821UP\\_Zu3te9Mz8pMgdSFPXZPRHsDc8jMQ17erGYJfOcrc-boq55jA9BilGWnk0E4ixt2v\\_MgIV6KHsG-NJBCiYzCg\\_KZ](http://sei.antaq.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_processo_exibir.php?wt7h6hFBI_9S3DJjGLl0dpQiiSEQL4RcICP821UP_Zu3te9Mz8pMgdSFPXZPRHsDc8jMQ17erGYJfOcrc-boq55jA9BilGWnk0E4ixt2v_MgIV6KHsG-NJBCiYzCg_KZ)>. Acesso em: 25 mar. 2019.

AIGNER, D.J., LOVELL, C.A.K., SCHMIDT, P. **Formulation and estimation of stochastic frontier production function models**, 1977, *Journal of Econometrics*, 6(1): 21–37.

BARROS, C.P. **A Benchmark Analysis of Italian Seaports Using Data Envelopment Analysis**. *Maritime Economics & Logistics*, 2006, 8:347–365.

BATTESE, G.E. e COELLI, T. J. **A Model for Technical Inefficiency Effects in a Stochastic Frontier Production for Panel Data**, *Empirical Economics*, 1995, 20: 325-332.

BOGETOFT, P., e OTTO, L. **Benchmarking with DEA, SFA, and R**. New York: Springer, 2011.

BRASIL, **Lei nº 12.815, de 05 de junho de 2013**. Dispõe sobre a exploração direta e indireta, pela União, de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Lei/L12815.htm)>. Acesso em: 25 mar. 2019.

BRASIL, Ministério da Economia: **Comexstat**, 2019. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Acórdão Nº 3661/2013**. Plenário. Relator: Ministra Ana Arraes. Sessão extraordinária de 10/12/2013. Disponível em: <<https://contas.tcu.gov.br/eproc/ObterDocumentoSisdoc?codArqCatalogado=6938305&seAbrirDocNoBrowser=true>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

BRASIL. Tribunal de Contas da União. **Acórdão Nº 2200/2015**. Plenário. Relator: Ministra Ana Arraes. Sessão de 2/9/2015. Disponível em: <<https://contas.tcu.gov.br/etcu/ObterDocumentoSisdoc?seAbrirDocNoBrowser=true&codArqCatalogado=9399648&codPapelTramitavel=53445337>>. Acesso em: 24 mar. 2019.

COELLI, T. J. e HENNINGSEN, A. **frontier: Stochastic Frontier Analysis**. R package version 1.1-2, 2013, Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=frontier>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

ESTACHE A., GONZÁLEZ, M.M. e TRUJILLO, L. **Efficiency gains from port reform and the potential for yardstick competition: Lessons from México**, *World Development*, 2002, 30(4): 545–560.

GONZÁLEZ, M.M. e TRUJILLO, L. **Efficiency measurement in the port industry: A survey of the empirical evidence**, *Journal of Transport Economics and Policy*, 2009, 43(2): 157–192.

MEEUSEN, W. e VAN DEN BROECK, J. **Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Functions with Composed Error**, *International Economic Review*, 1977, 8: 435-444.

ORIENT OVERSEAS CONTAINER LINE LIMITED, **OOCL.com**, c2019. Disponível em: <<https://www.oocl.com/eng/ourservices/vessels/gclass21413/Pages/ooclhongkong.aspx>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

SARRIERA, J. M., SEREBRISKY, T., ARAYA, G., GARMENDIA, C. e SCHWARTZ, J. **Benchmarking Container Port Technical Efficiency in Latin America and the Caribbean**, IDB Working Paper, 2013, No. 474.

SCHMIDT, P. e SICKLES, R.C. **Production Frontiers and Panel Data**, *Journal of Business and Economic Statistics*, 1984, 2: 367-374.

TOP 10 WORLD'S LARGEST CONTAINER SHIPS IN 2019, **Marine Insight**, 2019. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/know-more/top-10-worlds-largest-container-ships-in-2019/>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

Michel Bittencourt Weber  
Bacharel em Estatística pela Universidade Federal do Espírito Santo (2006).  
Especialista em Regulação de Serviços de Transportes Aquaviários.  
michel.weber@antag.gov.br