Análise envoltória de dados (DEA) como uma ferramenta para comparação de eficiência entre rotas de transporte de carga

***Data envelopment analysis (DEA) as a tool for
benchmarking freight transport route efficiency***

***Análisis de Envoltura de Datos (DEA) como uma
herramienta para la comparación de eficiencia
entre rutas de transporte de carga***

ISOTILIA COSTA MELO

Mestre em Engenharia de Produção.

Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Brasil

PAULO NOCERA ALVES JUNIOR

Doutor em engenharia de Produção

Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Brasil

DAISY APARECIDA DO NASCIMENTO REBELATTO

Professora Associada

Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, Brasil.

RESUMO O objetivo deste trabalho é apresentar a análise envoltória de dados (DEA) como uma possível ferramenta para comparar a eficiência de rotas de transporte de carga. Os Estados Unidos e o Brasil produzem mais de 80% dos grãos de soja do mundo. Isso representa 1,7% das exportações norte-americanas, e 10% das exportações brasileiras, que é uma economia menor. Transportar a soja, entre outros produtos de exportação, das fazendas até os principais portos, de forma mais eficiente, é o foco dos programas de investimento brasileiros. Uma ferramenta consolidada para a comparação de eficiência entre rotas irá ajudar os tomadores de decisão a direcionar investimentos. Este artigo determina as rotas das principais microrregiões produtoras até os principais portos de ambos os países, considerando a colheita de 2014. O uso de DEA SBM (Slack-Based Measure) e as variáveis iniciais são propostos. As variáveis são validadas por meio de correlação, regressão linear e análise de componentes principais (PCA). Após a aplicação do modelo, foi usado o método de desempate quantitativo do índice composto. Os resultados demonstraram que DEA pode ser usada para essa aplicação.

PALAVRAS-CHAVES: ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS. MODELAGEM DE TRANSPORTE. SOJA. *SLACK-BASED MEASURE*. EFICIÊNCIA DE ROTA.

ABSTRACT The purpose of this paper is to present data envelopment analysis (DEA) as a possible solution tool for benchmarking freight transport route efficiency. United States and Brazil produces more than 80% of the world soybeans. That represents 1.7% of American exports, but 10% of Brazilian exports, which is a smaller economy. Transporting soybeans, among other export products, from farmers to export ports more efficiently is the focus of Brazilian investment programs. A developed tool for benchmarking route will help decision makers to direct investments properly. This paper determines routes from main producing micro-regions to main export ports in both countries, considering the harvest of 2014. The use DEA SBM (Slack Based Measure) and initial variables are proposed. The variables are validated through correlation, linear regression and principal component analysis (PCA). After the application of the model, the quantitative tiebreaking method of composed index was applied. The results demonstrated that DEA can be used for this application.

KEYWORDS: DATA ENVELOPMENT ANALYSIS. FREIGHT TRANSPORT MODELING. SOYBEANS. SLACK BASED MEASURE. BRAZIL.

RESUMEN El objetivo de este trabajo es presentar un análisis de envoltura de datos (DEA) como una posible herramienta para comparar la eficiencia de rutas de transporte de carga. Los Estados Unidos y el Brasil producen más de 80% de los granos de soya en el mundo. Esto representa 1,7% de las exportaciones norte-americanas, y 10% de las exportaciones brasileñas, que es una economía menor. Transportar la soya entre otros productos de exportación de las haciendas hasta los principales puertos, de la forma más eficiente, es el foco de los programas de inversiones brasileños. Una herramienta consolidada para la comparación de eficiencia entre rutas ayudaría a los tomadores de decisión a direccionar inversiones. Este artículo determina las rutas de las principales micro-regiones productoras hasta los principales puertos en ambos países, considerando la cosecha de 2014. El uso de DEA SBM (Slack-Based Measure) y las variables iniciales son propuestas. Las variables son validadas por medio de correlación, regresión lineal y análisis de componentes principales (PCA). Después de la aplicación de modelo, fue usado el método de desempate cuantitativo del índice compuesto. Los resultados demuestran que DEA puede ser usado para esta aplicación.

PALABRAS-CLAVES: ANÁLISIS DE ENVOLTURA DE DATOS. MODELAJE DE TRANSPORTE. SOYA. *SLACK-BASED MEASURE*. EFICIENCIA DE RUTA.

INTRODUÇÃO

A soja é considerada o 44º. produto mais importante da economia mundial, numa lista de 1.238 itens, elaborada pelo projeto *The Observatory of Economic Complexity* (OEC) do Laboratório de Mídia do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (SIMOES; HIDALGO, 2011). Em 2014, os Estados Unidos (EUA) produziram 41% da soja do mundo e o Brasil, 40%. Isso representou 1,7% do total de exportações norte-americano e 10% do brasileiro (SIMOES; HIDALGO, 2011). Os dois países são os maiores produtores mundiais de soja,

somando 81% da produção mundial e, de acordo com a mesma fonte, têm a China como maior consumidor de seu produto. Além disso, ambos têm suas maiores regiões produtoras localizadas no centro territorial, tornando necessário o transporte da carga por centenas de quilômetros até os portos exportadores (SALIN, 2016).

A infraestrutura norte-americana para o transporte de soja dos agricultores até os principais portos de exportação está consolidada e tende a ser de baixo custo. Já o caso brasileiro é mais desafiador, o transporte de soja ainda enfrenta deficiências e se mostra mais oneroso. Para modificar a matriz de transporte, em 2007, o governo brasileiro criou o Plano de Aceleração do Crescimento 1 (PAC 1) e o integrou ao Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT). O PNLTL é executado pelos Ministérios dos Transportes e da Defesa. Planeja-se executá-lo em três fases, entre 2008 e 2023 (SALIN, 2016). Outros países também possuem grande extensão territorial (como a Rússia, por exemplo) ou estão inseridos dentro de um contexto econômico semelhante ao do Brasil (como a China). Porém, o escoamento nesses países não apresenta características tão semelhantes entre si quanto o brasileiro e o norte-americano. Por exemplo, a Rússia, assim como a China, tem um vasto deserto central, rodeado por uma cordilheira, o que força as regiões agrícolas produtoras a estarem próximas dos centros exportadores (PALLOT; NEFEDOVA, 2003; BLOOMBERG NEWS, 2017). Dado o contexto exposto, uma comparação entre Brasil e EUA se mostra pertinente para direcionar as políticas de investimentos brasileiras rumo à consolidação já atingida pelos EUA.

A técnica análise envoltória de dados (DEA) é uma ferramenta não paramétrica para mensuração da eficiência de determinado grupo analisado. Cada unidade analisada é chamada de DMU (*Decision Making Units*). Na DEA, são inseridas as variáveis (de entrada ou de saída) características de cada DMU e a DEA retorna um ranking de eficiência. Existem diversos modelos DEA, que podem ter escala constante ou variável e orientação para entrada (*inputs*), para saída (*outputs*) ou ambas simultaneamente. A DEA foi inicialmente utilizada para mensuração de investimentos públicos (como saúde e educação), mas foi aplicada a diversos setores nas últimas décadas (ALMEIDA; MARIANO; REBELATTO, 2006). Emrouznejad e Yang (2017), ao reverem a aplicação da DEA entre 1978 e 2017, apontam transportes como estado da arte.

O objetivo do trabalho é explorar a análise envoltória de dados (DEA) como uma ferramenta para comparação de eficiência entre rotas de transporte de carga em diferentes contextos econômicos. A discussão limites de homogeneidade para aplicação da DEA foge do escopo deste trabalho, os leitores interessados podem consultar Melo (2017). Para alcançar esse objetivo, é necessário mostrar que os obstáculos encontrados por Panakagos (2016) podem ser superados com DEA.

Este artigo está estruturado em cinco subtópicos. O Subtópico 2 apresenta os conceitos fundamentais para o entendimento do artigo, i.e., o que são rotas e como elas são comparadas e a definição do modelo DEA-SBM (*Slack-Based Measure*). O subtópico 3 detalha o método, o 4 exibe os resultados seguidos de uma breve discussão. Por último, as considerações finais são debatidas no subtópico 5.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Considerando a definição de Arnold (2006), corredores de transporte de carga incluem uma ou mais rotas que ligam centros de atividade econômica. Panagakos (2016) descreve o processo de desenvolvimento de um método para comparação de eficiência entre corredores de transporte de carga da União Europeia. Inicialmente, segundo o autor, pensou-se em 11 etapas. Os primeiros passos incluíam a escolha de um corredor com dados disponíveis e a determinação de seus segmentos críticos. Em seguida, a escolha de quatro ou cinco cargas típicas desse corredor. Depois, a partir da seleção de cadeias desse tipo de carga, se construiriam indicadores chave de desempenho (KPI) para as cadeias, se identificariam os obstáculos para cada KPI e se transformariam os KPI's de cadeias em KPI's de rotas. Finalmente, no passo 10, se transformaria o conjunto de valores de KPI's em um *ranking* de eficiência de rotas, para se poder compará-las quanto a sua eficiência em relação às demais. Pesos relativos devem ser dados a cada KPI no *ranking*. Esperava-se que diferentes participantes da cadeia propusessem diferentes pesos para esse cálculo, conforme seus interesses, que normalmente são antagônicos.

Panagakos (2016) aplicou esse método a um dos corredores economicamente mais importantes da Europa (Corredor Brenner). Entre os obstáculos enfrentados, foi mencionado que a amostra era muito pequena, o cenário resultante teve valor estatístico limitado. É importante lembrar que a DEA, proposta pelo presente trabalho, é não-paramétrica, portanto, não é afetada pelo tamanho da amostra. Depois de várias discussões, Panagakos (2016) decidiu pela exclusão da etapa 10 do método. O motivo para essa decisão foi a dificuldade de atribuir pesos aos KPI's. A DEA gera como resultado um *ranking* de unidades analisadas (chamadas DMU's, *Decision Making Units*). Para o *ranking*, os modelos DEA escolhem automaticamente os pesos que são mais favoráveis para cada DMU e ignoram pesos menos favoráveis, atribuindo-lhes zero (COELLI; RAO; BATTESE, 1998), resolvendo obstáculos encontrados por Panagakos (2016). A ideia de combinar DEA com análise de eficiência de rotas de transporte de carga também foi desenvolvida, simultânea e independentemente do presente trabalho, por Oliveira e Cicolin (2016).

Em prol do maior entendimento do leitor a respeito de como funciona o modelo DEA ancorado em folgas (SBM), segue uma demonstração resumida, fundamentada no artigo de Tone (2001). Para maiores esclarecimentos, consulte o artigo original. Lidando com n DMU's com matrizes, respectivamente, de *inputs* e *outputs*, $X = (x_{ij}) \in \mathbb{R}^{m \times n}$ e $Y = (y_{ij}) \in \mathbb{R}^{s \times n}$. Assume-se que os dados são positivos, i.e., $X > 0$ e $Y > 0$. Conforme a Equação 1, a função produção é definida como: $P = \{(x, y) | x \geq X\lambda, y \leq Y\lambda, \lambda \geq 0\}$ (1)

Onde λ é um vetor não negativo em $\mathbb{R}^n$. É possível impor algumas restrições em λ , como $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ (como no modelo BBC), se for necessário modificar o conjunto de produção. Considerando uma expressão para descrever certa DMU (x_0, y_0) , conforme Equações 2 e 3:

$$x_0 = X\lambda + s^-, \quad (2)$$

$$y_0 = Y\lambda + s^+, \quad (3)$$

Com $\lambda \geq 0$, $s^- \geq 0$ e $s^+ \geq 0$. O vetor $s^- \in \mathbb{R}^m$ e $s^+ \in \mathbb{R}^s$ indica, respectivamente, o excesso de *inputs* e a falta de *outputs* dessa expressão, isto é, as folgas (SBM, em inglês, significa mensuração ancorada em folgas). A partir da condição $\lambda \geq 0$ e $X > 0$, chega-se à Equação 4:

$$x_0 \geq s^- \quad (4)$$

Usando s^- e s^+ , pode-se definir o índice ρ , para eficiência, de acordo com a Equação 5:

$$\rho = \frac{1 - (1/m) \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}}{1 - (1/s) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}} \quad (5)$$

Pode-se observar que ρ atende a duas das quatro propriedades mais importantes para realizar mensurações de eficiência: 1) as medições devem ser invariantes com relação às unidades de medida; 2) as medições devem decrescer de maneira monótona para toda folga de *inputs* e *outputs*. A partir da quarta propriedade (a medição deve ser determinada apenas consultando o conjunto referência de onde a DMU é originária), resulta na Equação 6:

$$0 < \rho \leq 1. \quad (6)$$

No esforço de estimar a eficiência de (x_0, y_0) , Tone (2001) formula programa fracionário em λ , s^- e s^+ conforme Equações 7, 8, 9 e 10.

$$\begin{aligned} & \text{(SBM)} \\ & \text{Minimizar } \rho = \frac{1 - (1/m) \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}}{1 - (1/s) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}}. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Sujeito a } x_0 = X\lambda + s^-, \quad (8)$$

$$y_0 = Y\lambda + s^+, \quad (9)$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0. \quad (10)$$

Para linearizar, Tone (2001) multiplica uma variável escalar positiva t para tanto o numerador quanto o denominador de ρ . Isso não causa alterações em ρ . Ajusta-se t para que o denominador se torne 1. Assim, esse termo é movido para as restrições. O objetivo passa ser minimizar o numerador, resultando na reformulação das Equações 11, 12, 13, 14 e 15:

$$\text{Minimizar } \tau = t - (1/m) \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0} \quad (11)$$

$$\text{Sujeito a } \mathbf{1} = t + (1/s) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}, \quad (12)$$

$$x_0 = X\lambda + s^-, \quad (13)$$

$$y_0 = Y\lambda + s^+, \quad (14)$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0. \quad (15)$$

O problema já citado é não linear uma vez que contém termos não lineares $ts_r^+ (r = 1, \dots, s)$. No entanto, pode-se transformá-lo num problema linear definido pela Equação 16:

$$s^- = ts^-, s^+ = ts^+ \text{ e } \Lambda = t\lambda. \quad (16)$$

Assim, a programação linear se expressa pelas Equações 17, 18, 19, 20 e 21:

$$\text{Minimizar } \tau = t - (1/m) \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{i0}, \quad (17)$$

$$\text{Sujeito a } \mathbf{1} = t + (1/s) \sum_{r=1}^s s_r^+ / y_{r0}, \quad (18)$$

$$tx_0 = X\Lambda + s^-, \quad (19)$$

$$ty_0 = Y\Lambda + s^+, \quad (20)$$

$$\Lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0 \text{ e } t > 0. \quad (21)$$

A solução ótima de $(\tau^*, t^*, \Lambda^*, s^{*-}, s^{*+})$ é dada pela Equação 22:

$$\rho^* = \tau^*, \lambda^* = \Lambda^* / t^*, s^{*-} = s^{*-} / t^*, s^{*+} = s^{*+} / t^+ \quad (22)$$

Ancorado nessa solução, define-se uma DMU (x_0, y_0) como eficiente, no modelo SBM, quando $\hat{n}^* = 1$.

MÉTODOS

O tipo de carga, soja, foi predefinido em prol do desenvolvimento econômico nacional. A Figura 1 explica o método empregado para o desenvolvimento do *ranking* de eficiência de transporte, usando DEA.

Figura 1 – Método proposto para construção do ranking de eficiência em rotas de transporte de carga.

Em todo o texto, os conceitos de rota e corredor seguem as definições de Panagakos (2016): uma rota é uma alternativa de transporte entre uma origem e um destino, e corredor é um conjunto de rotas que ligam dois pontos de relevância econômica. No presente estudo, corredores ligam microrregiões produtoras a portos exportadores. As rotas foram definidas considerando a colheita de 2014 (um ano não afetado por eventos climáticos extraordinários). As rotas foram estabelecidas a partir das três principais microrregiões produtoras de cada Estado até os principais portos de exportação. No Brasil, de Rio Grande do Sul (RS), Paraná (PR), Mato Grosso do Sul (MS), Goiás (GO), Mato Grosso (MT) até os portos de Santos, Paranaguá e Rio Grande. Nos EUA, de Iowa (IA), Illinois (ILL), Missouri (MO), Minnesota (MN), e Indiana (IN) até os portos do Golfo do Mississippi e *Pacific Northwest Complex* (NPW) (SALIN, 2015). As distâncias rodoviárias, para ambos os países, foram determinadas usando o *Google Earth* (2016).

Para determinar a quantidade de soja colhida, no Brasil, foram consultados Imea (2015), Seab (2015), Emater (2014), Siga (2015) e Goiás (2015) e, para determinar rotas e corredores, foram consultados Ibge (2015), Antaq (2011), Ahrana (2005, 2012, 2013), Macrologística (2011, 2013), ALL (2016), Ferroeste (2016), Aliança (2016), Vieira (2002), Ojima (2004), Rocha e Parre (2009). Foram identificados nove corredores e 72 rotas.

Para determinar a quantidade de soja colhida, nos EUA, foi consultado Nass (2016), e para determinação de rotas e corredores, foram consultados Casavant et al. (2011), Salin (2015), US Corps of Engineers (2016), do Waterways Council (2016) e *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA, 2016). Foram identificados cinco corredores e 30 rotas.

Todas as rotas receberam um código, de acordo com os modais de transporte existentes e o país. Rotas norte-americanas começam com *E*. Se houver modal rodoviário, o código da rota recebe *R*. Se houver modal hidroviário fluvial, recebe *H*. Se houver modal ferroviário, recebe *F*.

Golany e Roll (1989), ao discutirem os critérios para escolha de um modelo DEA adequado e das variáveis, apontam a necessidade de ter em mente o contexto integral do problema. Um dos meios apontados para isso é a revisão de literatura. A proposta inicial de variáveis foi: combustível consumido (diesel), como *input*, colheita (assumindo toda a colheita foi transportada), como *output*, emissões e fator de descarte, como *outputs* indesejados. As duas primeiras variáveis são utilizadas por Oliveira e Cicolin (2016) numa aplicação similar de DEA. Emissões é explicitamente citada por Panagakos (2016). Esse autor enfoca que empregou outras variáveis ambientais, mas não enumera todas.

A variável *diesel* foi pensada para representar o custo de transporte. Pois o diesel é o combustível presente em todos os modais de ambos os países, cujo preço é regido por cotações internacionais. Ela foi calculada usando o método desenvolvido por *Texas Instruments* (TTI, 2012). A variável *emissões* é encontrada com frequência na literatura (CAMIOTO; MARIANO; REBELATTO, 2014), para seu cálculo foi adotado o método *bottom-up* com os fatores do Greenhouse Gas Protocol (2016). A variável *fator de descarte* foi pensada para representar os resíduos gerados pelos modais, após um ciclo econômico. Ela é calculada por meio da multiplicação de duas frações. A primeira fração é a duração de um ciclo econômico (assumido 100 anos) pela idade média da frota daquele modal. A segunda fração é o tamanho da frota de um modal necessária para transportar a colheita da microrregião estudada dividida pela frota necessária para transportar toda colheita nacional. No caso de uma rota com vários modais, o fator de descarte total é a soma do fator de descarte para cada modal. O Quadro 1 mostra os dados utilizados.

Cód.	Diesel (l)	Emissões (kg de CO _{2eq})	Fator de Descarte	Produção (t)	Cód.	Diesel (l)	Emissões (kg de CO _{2eq})	Fator de Descarte	Produção (t)
R1	621988,69	71410,53	2,02	9020409,31	RF12	774569,96	52352,94	1,17	4141338,00
R2	100228,12	11507,19	0,53	2348669,66	FH1	117147,41	1019,56	0,28	2348669,66
R3	35791,44	4109,22	0,27	1197689,90	RFH1	473538,79	8901,80	3,08	9020409,31
R4	255876,86	29377,23	1,02	4527862,00	RHR1	752027,00	41477,19	2,90	5732615,00
R5	333271,71	38262,93	1,02	4527862,00	RHR2	713898,44	38398,32	2,90	5732615,00
R6	181253,64	20809,74	0,99	4415811,00	RHR3	174680,08	9436,63	0,69	1356822,00
R7	358399,55	41147,86	0,99	4415811,00	RHR4	165655,64	8707,91	0,69	1356822,00
R8	243263,69	27929,11	0,79	3504301,00	RHR5	220505,70	15262,83	0,65	1284631,00
R9	414811,45	47624,51	0,79	3504301,00	RHR6	211961,42	14572,88	0,65	1284631,00
R10	418526,12	48050,99	0,84	3737616,41	RHR7	81251,73	6762,58	0,17	327876,67
R11	463725,20	53240,30	0,84	3737616,41	RHR8	79070,98	6586,48	0,17	327876,67
R12	163806,18	18806,59	0,28	1220739,25	RHR9	39383,05	2986,05	0,10	196210,00
R13	162812,55	18692,51	0,28	1220739,25	RHR10	38078,02	2880,67	0,10	196210,00
R14	72966,64	8377,30	0,12	526437,12	RHR11	26440,07	1955,26	0,07	138044,60
R15	59560,86	6838,19	0,12	526437,12	RHR12	25521,92	1881,12	0,07	138044,60
R16	851893,26	97805,87	1,29	5732615,00	RHF1	689834,35	18797,54	1,96	5732615,00
R17	715243,71	82117,14	1,29	5732615,00	RHF2	159960,04	4068,71	0,47	1356822,00
R18	199421,28	22895,56	0,31	1356822,00	RHF3	203999,59	10176,56	0,44	1284631,00
R19	163449,72	18765,67	0,31	1356822,00	RHF4	77694,63	5465,41	0,12	327876,67
R20	144894,43	16635,33	0,29	1284631,00	RHF5	37254,38	2209,79	0,07	196210,00
R21	2138823,38	245558,32	2,20	9836300,00	RHF6	24666,35	1408,70	0,05	138044,60
R22	1906640,95	218901,45	2,20	9836300,00	EH1	33987,63	124,67	0,13	1369420,86
R23	1167677,66	134061,08	1,32	5886300,00	ERH1	119700,58	3726,77	0,42	2393696,94
R24	1060902,91	121802,27	1,32	5886300,00	ERH2	116068,79	3710,10	0,40	2285570,44
R25	1090712,86	125224,75	0,93	4141338,00	ERH3	98935,56	2794,63	0,37	2083632,71
R26	921688,49	105819,06	0,93	4141338,00	ERH4	119812,45	2422,38	0,38	2171837,58

F1	96249,41	1767,14	0,14	2348669,66	ERH5	156640,84	5654,04	0,39	2213830,83
F2	158919,08	2917,76	0,27	4527862,00	ERH6	111765,68	2592,89	0,35	1992434,14
F3	119688,69	2197,49	0,27	4415811,00	ERH7	54516,37	2112,17	0,18	1003565,21
F4	151921,76	2789,29	0,21	3504301,00	ERH8	82348,96	2807,86	0,35	1948290,88
F5	40735,23	747,90	0,04	526437,12	ERH9	37480,90	838,76	0,20	1089157,42
RH1	672621,23	47964,68	2,55	9020409,31	ERH10	119322,24	3214,23	0,32	1784318,53
RH2	146729,79	9227,81	0,67	2348669,66	ERH11	109157,14	2649,59	0,30	1706645,99
RH3	86800,88	6080,74	0,34	1197689,90	ERH12	81459,51	943,45	0,27	1537856,53
RH4	529047,97	55584,85	2,55	9020409,31	ERH13	96634,33	4310,89	0,26	1452890,27
RH5	91868,74	9205,19	0,67	2348669,66	ERH14	48944,99	1287,87	0,19	1065670,59
RH6	32503,49	3047,25	0,34	1197689,90	ERF1	570521,24	11560,99	0,64	2393696,94
RH7	719267,99	32235,16	2,55	9020409,31	ERF2	522894,27	9171,40	0,61	2285570,44
RH8	149589,90	4066,21	0,67	2348669,66	ERF3	479331,92	8586,39	0,56	2083632,71
RH9	91880,29	3864,33	0,34	1197689,90	ERF4	544326,78	9395,73	0,58	2171837,58
RF1	210252,40	8811,34	1,28	4527862,00	ERF5	617219,30	14906,10	0,59	2213830,83
RF2	397403,95	11848,76	2,55	9020409,31	ERF6	461537,86	5387,83	0,53	1992434,14
RF3	531723,81	33152,59	1,06	3737616,41	ERF7	208698,23	2950,14	0,27	1003565,21
RF4	153793,30	8546,38	0,35	1220739,25	ERF8	445556,94	9178,79	0,52	1948290,88
RF5	779261,84	65290,76	1,62	5732615,00	ERF9	273995,17	7259,94	0,29	1089157,42
RF6	182861,62	15272,19	0,39	1356822,00	ERF10	281827,76	3920,75	0,48	1784318,53
RF7	2031355,18	191737,03	2,78	9836300,00	ERF11	266092,99	3453,89	0,46	1706645,99
RF8	1062983,12	97216,66	1,67	5886300,00	ERF12	238382,38	2993,22	0,41	1537856,53
RF9	1028611,68	100629,55	1,17	4141338,00	ERF12	286951,62	4462,56	0,39	1452890,27
RF10	1564074,88	92699,26	2,78	9836300,00	ERF13	230205,75	4959,08	0,29	1065670,59
RF11	772399,06	36692,55	1,67	5886300,00	ERF14	334596,85	5381,09	0,37	1369420,86

Quadro 1 – Dados utilizados.

Para validação das variáveis, foi feita correlação linear, regressão linear e análise dos componentes principais, com auxílio do software STATA. A correlação pode indicar se as variáveis estão corretamente classificadas como *inputs* e *outputs* (GOLANY; ROLL, 1989). A regressão linear determina a reta da equação e permite extrapolar os resultados de relação entre as variáveis dependentes e independentes (IBID.). Análise de Componentes Principais (PCA) é um método simples de análise multivariada. O objetivo da análise é tomar p variáveis e encontrar suas combinações para produzir índices (chamados componentes principais), $Comp_1, Comp_2, Comp_3, \dots, Comp_p$, que não estão relacionados em ordem de importância e descrevendo a variação de dados. A falta de correlação significa que os índices são medição diferente das correlações de dados e a ordem é tal que,

$$Var(Comp_1) \geq Var(Comp_2) \geq Var(Comp_3) \geq \dots \geq Var(Comp_p)$$

denota a variância de $Comp_n$ (HAIR et al., 1995).

O modelo DEA SBM (*Slack Based Measure*) foi aplicado com auxílio do *software MATLAB*. Sendo, $X = (x_{ij}) \in R^{m \times n}$ e $Y = (y_{ij}) \in R^{s \times n}$, respectivamente, *inputs* e *outputs*, assumidos positivos, de uma DMU (x_0, y_0) . Esse modelo SBM, criado por Tone (2001), é um avanço do modelo aditivo (MARIANO, SOBREIRO; REBELATTO; 2015), por ser invariante à unidade de medida, em que a eficiência obtida é um valor entre 0 e 1. A eficiência desse modelo é calculada com base na média das folgas relativas, eliminando o problema dos falsos eficientes (DMUs eficientes, mas com folgas), e não necessita de orientação (minimiza *inputs* e maximiza *outputs* ao mesmo tempo).

Não se deseja maximizar as variáveis emissões e fator de descarte, apesar de elas serem *outputs*, pois elas representam um impacto negativo ao meio ambiente e à sociedade. Esse tipo de variável é chamado de *output* indesejável. Para minimizá-las com o aumento da eficiência, elas foram inseridas como *inputs*.

Um problema muitas vezes encontrado no *ranking* gerado por meio do DEA é o número de empates, optou-se pelo uso do método quantitativo de desempate do índice composto (LETA et al., 2005). Esse índice composto é a média normalizada da soma das eficiências padrão e invertida.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Quadro 2 mostra a correlação entre as variáveis. Observa-se que *emissões* têm uma relação muito forte com *diesel* (0,9274) e o fator de descarte com *produção* (0,9233). As relações entre *diesel* e *fator de descarte*; *diesel* e *produção*; e *produção* e *emissões* são fortes (respectivamente, 0,7311, 0,7792 e 0,9233). A relação entre *fator de descarte* e *emissões* é moderada (0,5998). O fato de o *input* ter uma relação, no mínimo, forte no mesmo sentido dos *inputs* sugere que o modelo possui validade.

Conforme Golany e Roll (1989), o fato de os *outputs* possuírem relação, no mínimo, moderada entre si, pode indicar redundância de variáveis no modelo. Em desenvolvimentos posteriores da DEA, essa interpretação foi mantida e agregada a outras técnicas, como, por exemplo, PCA (ADLER; YAZHEMSKY, 2010; COOK; TONE; ZHU, 2014).

	<i>Diesel</i>	<i>Emissões</i>	<i>Fator de Descarte</i>	<i>Produção</i>
Diesel	1			
Emissões	0,9274	1		
Fator de Descarte	0,7311	0,5998	1	
Produção	0,7792	0,7019	0,9233	1

Quadro 2 – Matriz de correlação entre *input* e *outputs*.

O Quadro 3 mostra a regressão linear entre as variáveis dependentes, *outputs*, e a variável independente, *input*. O Fator *R* indica o encaixe dessa relação (independente-dependentes) numa linha reta. Quanto mais alto *R-sq*, tanto mais perfeitamente as variáveis se encaixam e podem ser explicadas no modelo. E o Fator *P* é comparável ao erro. Observa-se que existe uma alta relação para todas as variáveis e uma baixa relação com o erro.

<i>Equações</i>	<i>Obs</i>	<i>Parms</i>	<i>RMSE</i>	<i>R-sq</i>	<i>F</i>	<i>Fator P</i>
F. Descarte	102	2	0,5333174	0,5345	114,8026	0,0000
Emissões	102	2	17146,14	0,8600	614,4568	0,0000
Produção	102	2	1658213	0,6070	154,4762	0,0000

Quadro 3 – Regressão linear das variáveis dependentes em relação à variável independente consumo de combustível (diesel).

A análise de PCA indicou que os dois primeiros componentes principais explicam 96,80% do modelo. Como ilustrado no Quadro 4, as variáveis apresentaram uma proporcionalidade semelhante em ambos os componentes, não justificando a exclusão de qualquer delas. Dadas as considerações até aqui mencionadas, as variáveis foram consideradas validadas.

<i>PCA</i>		
<i>Variáveis</i>	<i>Comp1</i>	<i>Comp2</i>
Diesel	0,5159	0,3757
Emissões	0,4842	0,6048
F. Descarte	0,4882	-0,5755
Produção	0,5110	-0,4025

Quadro 4 – Composição dos componentes principais.

A execução do modelo DEA-SBM inicialmente resultou em 12 DMU's com 100% de eficiência. Após aplicação do método de desempate do índice composto (LETA et al., 2005) não houve mais empates, a única DMU 100% eficiente foi a EH1, que representa a rota norte-americana exclusivamente hidroviária partindo do distrito de New Madrid, Missouri, até o Golfo do Mississipi. Os resultados estão compilados no Quadro 5.

<i>Rank</i>	<i>Cód.</i>	<i>Eficiência Padrão</i>	<i>Eficiência Invertida</i>	<i>Índice Composto</i>	<i>Distância Total(km)</i>	<i>Rotas</i>
1	EH1	1,0000	1,0000	1,0000	650,3	New Madrid - Golfo do Mississipi
2	F3	1,0000	0,9692	0,9841	414,7	Guarapuava - Paranaguá
3	F2	1,0000	0,9683	0,9785	537,0	Londrina - Paranaguá
4	F1	1,0000	0,9571	0,9742	627,0	Santa Maria - Rio Grande
5	F5	1,0000	0,9531	0,9459	1183,9	Chapadão do Sul – Santos
6	RH6	1,0000	0,9484	0,9347	245,5	Bagé – Rio Grande
7	RF2	1,0000	0,9456	0,9333	639,0	Ijuí – Rio Grande
8	F4	0,9074	0,9434	0,9265	663,3	Cascavel – Paranaguá
9	FH1	0,7188	0,9166	0,8440	640,0	Santa Maria – Rio Grande
10	R1	1,0000	0,9105	0,7998	593,0	Ijuí – Rio Grande
11	ERH12	0,5259	0,9045	0,7395	1286,3	Faribault – Golfo do Mississipi
12	ERH9	0,5338	0,9038	0,7386	745,7	Montgomery – Golfo do Mississipi
13	RH7	0,7301	0,9011	0,7066	804,0	Ijuí – Rio Grande
14	ERH8	0,4823	0,8918	0,6917	796,0	Clinton – Golfo do Mississipi
15	RF1	0,5330	0,8914	0,6913	634,5	Londrina – Paranaguá
16	R3	0,5292	0,8872	0,6859	257,0	Bagé – Rio Grande
17	ERH3	0,4596	0,8850	0,6820	961,4	McLean – Golfo do Mississipi
18	RH4	0,7411	0,8695	0,6808	516,5	Ijuí – Rio Grande
19	ERH4	0,4447	0,8689	0,6806	1224,3	Plymouth – Golfo do Mississipi
20	ERH14	0,4472	0,8666	0,6788	951,5	Audrain – Golfo do Mississipi
21	ERH1	0,4381	0,8593	0,6647	977,6	Edgard – Golfo do Mississipi
22	ERH6	0,4227	0,8552	0,6633	1204,4	Webster – Golfo do Mississipi
23	RH1	0,7095	0,8498	0,6595	710,0	Ijuí – Rio Grande
24	ERH2	0,4304	0,8427	0,6588	982,6	Champaign – Golfo do Mississipi
25	RF10	1,0000	0,8362	0,6579	1981,0	Canarana – Santos
26	R6	0,5097	0,8277	0,6481	353,0	Guarapuava – Paranaguá
27	ERH11	0,3776	0,8274	0,6312	1356,6	Cottonwood – Golfo do Mississipi
28	ERH7	0,3828	0,8141	0,6190	961,9	Knox – Golfo do Mississipi
29	ERH10	0,3570	0,8088	0,6129	1375,3	Lac Qui Parle – Golfo do Mississipi
30	RHF6	1,0000	0,7939	0,6124	1886,0	Primavera do Leste – Santos
31	RH8	0,3649	0,7865	0,6121	666,0	Santa Maria – Rio Grande

32	RH5	0,4285	0,7810	0,6112	348,5	Santa Maria – Rio Grande
33	R2	0,4099	0,7788	0,5954	367,0	Santa Maria – Rio Grande
34	ERH5	0,3566	0,7683	0,5920	1298,2	Woodbury – Golfo do Mississippi
35	R4	0,4741	0,7536	0,5912	486,0	Londrina – Paranaguá
36	RHF1	0,5057	0,7504	0,5786	1389,0	Jataí – Santos
37	ERH13	0,3307	0,7500	0,5697	1083,2	Nodaway – Golfo do Mississippi
38	ERF12	0,2521	0,7284	0,5441	2986,1	Faribault – NPW
39	ERF11	0,2583	0,7110	0,5430	2991,9	Cottonwood – NPW
40	R22	1,0000	0,7084	0,5399	1667,0	Canarana – Santos
41	RH2	0,3267	0,6856	0,5385	606,0	Santa Maria – Rio Grande
42	ERF10	0,2574	0,6832	0,5357	3004,9	Lac Qui Parle – NPW
43	R5	0,4406	0,6756	0,5347	633,0	Londrina – Santos
44	RH9	0,2670	0,6691	0,5229	778,0	Bagé – Rio Grande
45	RF11	0,5029	0,6564	0,5185	1742,0	Primavera do Leste – Santos
46	R8	0,3795	0,6529	0,5179	597,0	Cascavel – Paranaguá
47	ERF6	0,2456	0,6514	0,5069	4498,5	Webster – NPW
48	R7	0,4151	0,6435	0,5068	698,0	Guarapuava – Santos
49	RFH1	1,0000	0,6365	0,5000	645,0	Ijuí – Rio Grande
50	RH3	0,2644	0,6288	0,4877	692,0	Bagé – Rio Grande
51	ERF13	0,2141	0,6223	0,4820	3700,3	Nodaway – NPW
52	RHF2	0,2200	0,6205	0,4741	1368,0	Rio Verde – Santos
53	R21	0,9458	0,6096	0,4729	1870,0	Canarana – Paranaguá
54	ERF7	0,1886	0,5995	0,4711	3948,1	Knox – NPW
55	ERF2	0,2473	0,5986	0,4615	4206,0	Champaign – NPW
56	ERF3	0,2345	0,5814	0,4518	4214,1	McLean – NPW
57	R17	0,5134	0,5341	0,4514	1073,0	Jataí – Santos
58	ERF4	0,2360	0,5309	0,4445	4620,0	Plymouth – NPW
59	ERF15	0,1935	0,5087	0,4396	4554,8	New Madrid – NPW
60	ERF1	0,2469	0,4863	0,4346	4267,2	Edgard – NPW
61	ERF8	0,2237	0,4787	0,4301	4080,8	Clinton – NPW
62	RF5	0,4752	0,4661	0,4178	1462,0	Jataí – Paranaguá
63	R10	0,3499	0,4587	0,4143	963,0	Dourados – Paranaguá
64	ERF14	0,1747	0,4562	0,4090	3818,8	Audrain – NPW
65	RF7	0,8134	0,4541	0,4067	2069,0	Canarana – Paranaguá
66	R16	0,4998	0,4449	0,4032	1278,0	Jataí – Paranaguá
67	RF3	0,3272	0,4350	0,3966	1741,9	Dourados – Santos
68	R9	0,3326	0,4325	0,3933	1018,0	Cascavel – Santos
69	R11	0,3430	0,4155	0,3877	1067,0	Dourados – Santos

70	RF4	0,1940	0,4128	0,3877	1601,9	Sidrolândia – Santos
71	R15	0,2401	0,3894	0,3743	973,0	Chapadão do Sul – Santos
72	R24	0,4977	0,3684	0,3486	1550,0	Primavera do Leste – Santos
73	R20	0,2102	0,3605	0,3482	970,0	Cristalina – Santos
74	ERF9	0,1647	0,3159	0,3478	4227,2	Montgomery – NPW
75	R19	0,2090	0,3066	0,3326	1036,0	Rio Verde – Santos
76	R14	0,2160	0,3039	0,3255	1192,0	Chapadão do Sul – Paranaguá
77	RF12	0,3347	0,2796	0,3193	2222,0	Sorriso – Santos
78	RF6	0,1914	0,2248	0,3181	1452,0	Rio Verde – Paranaguá
79	RHF3	0,1758	0,1996	0,3172	1715,0	Cristalina – Santos
80	RF8	0,4621	0,1909	0,3156	1846,0	Primavera do Leste – Paranaguá
81	R23	0,4917	0,1692	0,3151	1706,0	Primavera do Leste – Paranaguá
82	R13	0,1947	0,1385	0,3051	1147,0	Sidrolândia – Santos
83	R12	0,1944	0,1099	0,3036	1154,0	Sidrolândia – Paranaguá
84	R18	0,1972	0,1005	0,2828	1264,0	Rio Verde – Paranaguá
85	RHR12	0,4819	0,0798	0,2533	1751,0	Primavera do Leste – Santos
86	RHF5	0,2088	0,0783	0,2442	1987,0	Canarana – Santos
87	RHR2	0,4315	0,0444	0,2373	1232,0	Jataí – Santos
88	R26	0,3379	0,0430	0,2239	1914,0	Sorriso – Santos
89	RHR1	0,4256	0,0286	0,2128	1294,0	Jataí – Santos
90	R25	0,3324	0,0247	0,1662	2265,0	Sorriso – Paranaguá
91	RHR11	0,3270	0,0179	0,1635	1813,0	Primavera do Leste – Santos
92	RHF4	0,1356	0,0000	0,1632	2392,0	Sorriso – Santos
93	RF9	0,3210	0,0000	0,1605	2429,0	Sorriso – Paranaguá
94	RHR10	0,1372	0,0000	0,1188	1830,0	Canarana – Santos
95	RHR4	0,1818	0,0000	0,1131	1211,0	Rio Verde – Santos
96	ERF5	0,2255	0,0000	0,1127	4800,3	Woodbury – NPW
97	RHR9	0,1347	0,0000	0,1065	1892,0	Canarana – Santos
98	RHR6	0,1550	0,0000	0,0918	1580,0	Cristalina – Santos
99	RHR3	0,1774	0,0000	0,0887	1273,0	Rio Verde – Santos
100	RHR5	0,1529	0,0000	0,0764	1642,0	Cristalina – Santos
101	RHR8	0,1007	0,0000	0,0593	2235,0	Sorriso – Santos
102	RHR7	0,0994	0,0000	0,0497	2297,0	Sorriso – Santos

Quadro 5 – Resultados da eficiência das rotas, após desempate.

Foi feita uma regressão linear entre a distância da rota e os resultados de eficiência, mas uma relação fraca foi encontrada (0,2355), mesmo se considerando apenas rotas com menos de 2.000 km, a relação muito fraca se manteve (0,1259).

O Quadro 6 sumariza os resultados do Quadro 5 por quantidade de ocorrência de determinada característica comum entre todas as rotas analisadas. Por exemplo, existem rotas com um, dois ou três modais. Entre 30 rotas mais eficientes, foram encontradas 9 com apenas um modal e 21 com dois (conforme indicado no Quadro 6). Paralelamente, entre as menos eficientes, foram encontradas também 9 com um modal, 6 com dois e 15 com três (Quadro 6). Interpretação semelhante deve ocorrer para as colunas que apontam as características: tipo de modal presente na rota (rodoviário, ferroviário e hidroviário) e país.

<i>Resultados</i>	<i>Quantidade de Modais</i>				<i>Tipos de Modal</i>			<i>País</i>	
	<i>Empates</i>	<i>Um</i>	<i>Dois</i>	<i>Três</i>	<i>Rodoviário</i>	<i>Ferrovário</i>	<i>Hidroviário</i>	<i>EUA</i>	<i>Brasil</i>
30 mais eficientes	0	9	21	0	23	15	13	13	17
30 menos eficientes	0	9	6	15	29	8	15	2	28

Quadro 6 – Resultados sumarizados por características de rotas mais e menos eficientes.

Observa-se, no Quadro 6, uma preponderância de rotas norte-americanas entre as mais eficientes e brasileiras entre as menos eficientes, o que está alinhado como relatório anual norte-americano que compara o transporte de soja entre os dois países (SALIN, 2015). Entre os mais eficientes, predominam rotas com dois modais, entre os menos eficientes, rotas com três, sugerindo que existe um limite na comodidade para que haja eficiência. Isso também foi apontado por Panagakos (2016) na sua análise do contexto europeu. O modal rodoviário é praticamente obrigatório em todas as rotas por ser um modal com a flexibilidade necessária para buscar a colheita em cada fazenda e levá-la até os pontos de transbordo para outros modais, portanto, o modal rodoviário é predominante entre todas as rotas. Em seguida, entre as eficientes predomina o modal ferroviário (bem próximo ao hidroviário). Entre as rotas ineficientes predomina, em seguida, o modal hidroviário. Marquez e Cantillo (2013), ao analisarem corredores de exportação colombianos, concluem que o modal hidroviário é o de menor custo. Entre as limitações do presente trabalho, o fato de não ter incorporado custo (devido à indisponibilidade da informação) pode ter levado a considerar o modal hidroviário menos eficiente que o ferroviário, na maioria dos casos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Salin (2015) menciona que as rotas partindo do Mato Grosso (MT) tendem a custar mais do que as rotas norte-americanas, o que é validado pelos resultados encontrados neste trabalho. As rotas brasileiras menos eficientes tendem a ser aquelas que saem de MT. Além disso, Salin afirma que algumas rotas da região Sul do Brasil, destacadamente as do Paraná (PR), tendem a custar menos do que várias rotas norte-americanas, destacadamente as que partem do Estado de Iowa para os portos do Pacífico. Isso vai ao encontro dos resultados deste trabalho, pois

as rotas brasileiras mais eficientes são da região Sul. A rota brasileira mais eficiente é a F3, de Guarapuava (PR) a Paranaguá.

Oliveira e Cicolin (2016) também mencionam que as rotas do Paraná se mostram mais eficientes. Os mesmos autores também afirmam haver relação entre eficiência e distância. Embora predominem rotas ineficientes entre aquelas com extensão superior a 2.000 km, o presente trabalho encontrou uma relação fraca entre extensão da rota e eficiência (0,2355). Oliveira e Cicolin (2016) concluem que as rotas com intermodalidade e com o modal hidroviário fluvial tendem a ser mais eficientes. Panagakos (2016) afirma que as rotas com intermodalidade são preferidas por priorizar a sustentabilidade. Marquez e Cantillo (2013), ao analisarem custos internos e externos de rotas de exportação colombianas, também concluem que o modal hidroviário fluvial possui menor custo, seguido pelo ferroviário. Isso corrobora os resultados de Oliveira e Cicolin (2016). Este trabalho apresentou rotas com dois modais entre as mais eficientes, porém as com três modais estavam entre as menos eficientes, sugerindo que existe um limite para a intermodalidade.

O modal ferroviário, no caso brasileiro, se revelou mais eficiente que o hidroviário, enquanto, no caso norte-americano, a situação se mostrou inversa. Uma explicação possível é o fato de o presente trabalho considerar apenas as hidrovias do Paraná-Tietê e da Lagoa do Patos, cuja capacidade de carga é limitada devido a restrições estruturais (em média, um reboque empurra três barcaças com capacidade de carga máxima, em média, de 1.287 toneladas) (AHRANA, 2013) (ALIANÇA, 2016), enquanto, Oliveira e Cicolin (2016) analisaram hidrovias na região Norte, cuja capacidade de carga é possivelmente maior. Por exemplo, nos EUA, em média, uma composição de barcaças é composta por três reboques empurrando 15 barcaças cuja capacidade de carga máxima é de 1.620 toneladas (WATERWAYS COUNCIL, 2016). Ou seja, em uma viagem, as composições norte-americanas transportam aproximadamente 6,2 vezes mais carga do que as brasileiras.

Considera-se que o presente trabalho demonstrou que a ferramenta DEA pode ser usada, com sucesso, para comparar a eficiência das rotas de transporte de carga. A DEA superou os problemas de distribuição de peso encontrados por Panagakos (2016). O problema de empates, gerado pela distribuição de pesos da DEA, foi superado com uso do método de desempate do índice composto e os resultados finais foram compatíveis com a literatura (SALIN, 2015) (OLIVEIRA, CICOLIN, 2016).

Entre as limitações do presente trabalho, está o fato de não se conseguir aferir, para um contexto de análise tão amplo, fatores impactantes na eficiência, por exemplo, qualidade da pista, rapidez do atendimento dos operadores, flexibilidade e rapidez no atendimento nos postos de fiscalizações. Alguns desses fatores são subjetivos e sua mensuração é dificultada. Panagakos (2016) também enumerou este, entre os desafios encontrados. Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação da mesma técnica num contexto menor, por exemplo, apenas rodovias de uma pequena região economicamente relevante, em que todos esses fatores podem ser levantados com precisão.

Para trabalhos futuros, recomenda-se expandir variáveis, como, custos de transporte, custos de manutenção de rotas, desequilíbrio comercial, prazo de entrega, tipo de carga,

disponibilidade de silos e uma variável que represente valores sociais, como a qualidade de vida do operador. Também é recomendado explorar outras possibilidades modelos DEA, como rede e modelos dinâmicos; análise janela estrutural e de desempate com o índice triplo (MARIANO; REBELATTO, 2014).

Agradecimentos

Os autores agradecem à *Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)* por financiar este projeto.

REFERÊNCIAS

ADLER, N.; YAZHEMSKY, E. Improving discrimination in data envelopment analysis: PCA-DEA or variable reduction. **European Journal of Operational Research**. Londres, p. 273-284, jan. 2010.

AHRANA, Administração da Hidrovia do Paraná. **Dados e Informações Hidrovia do Rio Paraná**. São Paulo: Ahrana, 2012, 52 p. Disponível em: http://www.ahrana.gov.br/dados_informacoes.html. Acessado em: jun. 2016.

_____. **Estatísticas de Movimentação de Carga**. São Paulo: Ahrana, 2013, 26 p. Disponível em: http://www.ahrana.gov.br/dados_operacionais.html. Acessado em: jun. 2016.

_____. **A Hidrovia do Paraná**. São Paulo: Ahrana, 2005, 28 p. Disponível em: <http://www.cooperhidro.com.br/palestras/ruy-ahrana.pdf>. Acessado em: jun. 2016.

ALIANÇA (Rio Grande do Sul). **Trevisa Investimentos, Frota**. Disponível em: <http://www.trevisa.com.br/alianza/frota.html>. Acessado em: jun. 2016.

ALL - AMÉRICA LATINA LOGÍSTICA S.A. (Brasil). **Malha Ferroviária**. Disponível em: http://pt.rumolog.com/default_pti.asp?idioma=0&conta=45. Acessado em: jun. 2016.

ALMEIDA, M.; MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. N. Análise envoltória de dados – evolução e possibilidades de aplicação. **IX Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais (SIMPOI)**, São Paulo, 2006.

ARNOLD, J. **Best practices in Management of International Trade Corridors**. Trade Logistics Group. Transport Papers TP-13. The World Bank Group, Washington. DC, 2006.

BAUMEL, P. Measuring Bulk Product Transportation Fuel Efficiency. **Transportation Research Forum**. Washington, 2011.

BAUMEL, P.; HURBURGH, C. R.; LEE, T. **Estimates of Total Fuel Consumption in Transporting Grain from Iowa to Major Grain Countries by Alternatives Modes and Routes**. Iowa Grain Quality Initiative. Iowa, 2015.

BLOOMBERG NEWS. Farming the World: China's Epic Race to Avoid a Food Crisis. **Bloomberg**. Nova Iorque, p. 1-5, mai. 2017. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/graphics/2017-feeding-china/>. Acesso em: 28 set. 2017.

BUREAU OF TRANSPORTATION STATISTICS. **National Transportation and Statistics**. United States Department of Transportation, Washington. Disponível em: http://www.rita.dot.gov/bts/sites/rita.dot.gov.bts/files/publications/national_transportation_statistics/html/table_01_26.html_mfd. Acessado em: jun. 2016.

CAMIOTO, F. C.; MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. N. Efficiency in Brasil's industrial sectors in terms of energy and sustainable development. **Environmental Science & Policy**. Londres, 2014.

CASAVANT, K., et al. Study of Rural Transportation Issues. No 147544. **Research Reports**. United States Department of Agriculture. Agricultural Marketing Service. Transportation and Marketing Program, 2010.

CHARNES. A., et al. Foundations of data envelopment analysis for Pareto-Koopmans efficient empirical production functions. **Journal of Econometrics**. Nova Iorque, 1985, p. 91-100.

CHARNES. A.; COOPER. W. W.; RHODES. E. Measuring the efficiency of the decision making units. **European Journal of Operational Research**. Londres, 1978, p. 429-444.

COELLI, T. J.; RAO, D. S. P.; BATTESE, G. E. **An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis**, 2. ed. Massachusetts: Springer, 1998, 341 p.

COOK, W. D.; TONE, K.; ZHU, J. Data envelopment analysis: Prior to choosing a model. **Omega**, v. 44 n. 1-4, 2014.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Anuário Estatístico das Rodovias Federais**. Brasília, República Federativa do Brasil, 2010, 687 p. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/estatisticas-de-acidentes/anuario-2010.pdf>. Acessado em: jun. 2016.

EMATER. **Acompanhamento da Safra: Safra 2014/2015**. Porto Alegre: Emater, 2014, 6 p. (Séries Históricas). Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/servicos/informacoes-agropecuarias.php#acompanhamento-de-safra>. Acessado em: jun. 2016.

EMROUZNEJAD, A.; YANG, G. A survey and analysis of the first 40 years of scholarly literature in DEA: 1978 - 2016. **Socio-economic Planning Sciences**. Washington, p. 1-5. *In-Press* 2017.

FEDERAL RAILWAY ADMINISTRATION OFFICE OF SAFETY ANALYSIS. **Total Accidents/Incidents Jan - Dec (2010)**. Disponível em: <http://safetydata.fra.dot.gov/officeofsafety/publicsite/summary.aspx>. Acessado em: jun. 2016.

FERREIRA, A. N. **Estudo do Efeito de Acidentes na Hidrovia Tietê-Paraná: Aspectos Preventivos**, 150s. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000, Cap. 4.

FERROESTE (Paraná). Secretaria de Infraestrutura e Logística. **Malha ferroviária**. Disponível em: <http://www.ferroeste.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=47>. Acessado em: jun. 2016.

GOIÁS. Instituto Mauro Borges de Estatística e Estudos Socioeconômicos. Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento. **Estatísticas Municipais: Séries Históricas, 2015**. Disponível em: < <http://www.imb.go.gov.br/>>. Acessado em: jun. 2016.

GOLANY, B.; ROLL, Y. An Application Procedure for DEA. **Omega**. Oxford, v. 17, n. 3, p. 237-250, 1989.

GOOGLE COMPANY (Estados Unidos). **Google Earth**. Disponível em: <https://www.google.com/earth/>. Acessado em: jun. 2016.

GREENHOUSE GAS PROTOCOL. World Resources Institute (WRI). **Calculating CO2 Emissions from Mobile Sources**. 1.3. Washington, 2016, 11 p. Disponível em: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/co2-mobile.pdf>. Acessado em: jun. 2016.

HAIR, J. F., et al. **Multivariate Data Analysis**. Prentice-Hall: Englewood Cliffs. NJ, 1995.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Ministério do Planejamento. **Divisão Regional**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/default_div_int.shtm?c=1. Acessado em: jun. 2016.

IMEA – Instituto Matogrossense de Economia Aplicada. **Boletim Semanal de Soja**, 358. ed. Cuiabá: Imea, 2015, 12 p. Disponível em: http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/R404_2015_06_19_BSSoja.pdf. Acessado em: jun. 2016.

LETA, F. R. et al. Métodos De Melhora De Ordenação em DEA Aplicados à Avaliação Estática de Tornos Mecânicos. **Investigação Operacional**, v. 25, n. 2, p. 229-242, 2005.

MACROLOGÍSTICA (Brasil). CNI - Confederação Nacional da Indústria. **Projeto Centro-Oeste Competitivo**. São Paulo, 2013, 75 p. Disponível em: http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2015/10/22/9958/ProjetoCentro-OesteCompetitivo.pdf. Acessado em: jun. 2016.

MACROLOGÍSTICA (Brasil). CNI - Confederação Nacional da Indústria. **Projeto Sul Competitivo**. São Paulo, 2013, 75 p. Disponível em: <http://www.macrologistica.com.br/images/stories/palestras/Projeto-Sul-Competitivo-Relatorio-Institucional-Porto%20Alegre-28-de-Junho-2011.pdf> . Acessado em: jun. 2016.

MARIANO, E. B.; REBELATTO, D. A. N. Transformation of wealth produced into quality of life: analysis of the social efficiency of nation-states with the DEA's triple index approach. **Journal of the Operational Research Society**. Londres, p. 1.664-1.681, 2014.

MARIANO, E. B.; SOBREIRO, V. A.; REBELATTO, D. A. N. Human development and data envelopment analysis: a structured literature review. **Omega**. Oxford, p. 33-49, jul. 2017.

MARQUEZ, L.; CANTILLO, V. Evaluating strategic freight transport corridors including external costs. **Transportation Planning and Technology**, 36:6, 529-546, 2013.

MELO, I. C. **Análise de Eficiência em Rotas de Transporte de Soja nos Principais Corredores Brasileiros e Norte-Americanos utilizando Análise Envoltória de Dados**

(DEA), 2017, 136s. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017. Cap. 2.

NASS-National Agricultural Statistics Services. **Statistics by State**. Disponível em: https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/. Acessado em: jun. 2016.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, **State Traffic Safety Info**. Disponível em: <http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-30/ncsa/STSI/USAWEBREPORT.HTM>. Acessado em: jun. 2016.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **Distances Between United States Ports**, 12. ed. Washington: NOAA, 2012, 56 p. Disponível em: <http://www.nauticalcharts.noaa.gov/ncd/distances-ports/distances.pdf>. Acessado em: jun. 2016.

OJIMA, A. L. R. O. **Análise da Movimentação Logística e Competitividade da Soja Brasileira: Uma Aplicação de Um Modelo Espacial de Programação Quadrática**, 79s. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestre em Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Universidade de Campinas. Campinas, 2004.

OLIVEIRA, A. L. R.; CICOLIN, L. O. M. Evaluating the logistics performance of Brazil's corn exports: A proposal of indicators. **African Journal Of Agricultural Research**. Johannesburg, p. 693-700, fev. 2016.

PALLOT, J.; NEFEDOVA, T. Geographical Differentiation in Household Plot Production in Rural Russia. **Eurasian Geography And Economics**. Moscou, p. 40-64, jan. 2003.

PANAGAKOS, G. **Green Corridors, Basics**. In: PSARAFTIS, H. N. (Org).

Green Transportation Logistics: The Quest for Win-Win Solution. Suíça, Springer, 2016. Cap. 3, p. 81-121.

ROCHA, C. B.; PARRÉ, J. L. Estudo da Distribuição Espacial do Setor Agropecuário do Rio Grande do Sul. **Análise Econômica**. Porto Alegre, p. 139-160, set. 2009.

SALIN, D. **Soybean Transportation Guide: Brazil, 2015**. U.S. Dept. of Agriculture. Agricultural Marketing Service, 2016. Disponível em: <https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Brasil%20Soybean%20Transportation%20Guide%202014.pdf> Acessado em: jun. 2016.

SEAB – Secretaria de Abastecimento. **Estimativas de Safra. 2015**. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/>. Acessado em: jun. 2016.

SIGA - Associação dos Produtores de Soja de Mato Grosso do Sul. **Circular Técnica: Acompanhamento da Safra 2013/2014**, 56. ed. Campo Grande: Siga, 2014, 9 p. Disponível em: <<http://sigaweb.aprosojams.org.br/>>. Acessado em: jun. 2016.

SIMÕES, A. J. C., HIDALGO, C. A. The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development. **Workshops at the Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence**, São Francisco, 2011.

TONE. K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. **European Journal of Operational Research**. Londres, p. 498-509, 2001.

TTI - Texas Transportation Institute. **A Modal Comparison of Domestic Freight Transportation Effects on the General Public: Final Report**. Houston, National Waterway Foundation, 2007, 69 p. Disponível em: http://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/Phase_II_Report_Final_121907.pdf. Acessado em: jun. 2016.

UNITED SOYBEAN BOARD. **Farm to market: a soybean's journey from field to costumer**. Informa Economics, Washington, 2012. Disponível em: <http://ntl.bts.gov/lib/32000/32800/32855/STELPRDC5084108.pdf>. Acessado em: jun. 2016.

US CORPS OF ENGINEERS. U.S. ARMY. **Planning Center of Expertise for Inland Navigation (PCXIN)**, 2016. Disponível em: <http://outreach.lrh.usace.army.mil/>. Acessado em: jun. 2016.

VIEIRA, N. M. **Caracterização da Cadeia Produtiva da Soja em Goiás**, 123s. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção. Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

WATERWAYS COUNCILW. **Waterways Systems**. Disponível em: <http://waterwayscouncil.org/waterways-system/>. Acessado em: jun. 2016.

Submetido em: 2-12-2016

Aceito em: 26-10-2017