

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL DE TERMINAIS BRASILEIROS ESPECIALIZADOS EM CONTÊINERES USANDO UMA ADAPTAÇÃO DO MODELO DE LI & REEVES

Ana Paula dos Santos Rubem

Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 - bloco D - São Domingos, 24210-240 Niterói-RJ
anarubem@id.uff.br

Luana Carneiro Brandão

Doutorado em Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 - bloco D - São Domingos, 24210-240 Niterói-RJ
luanabrandao@id.uff.br

Eduardo Fagundes Costa

Mestrado em Engenharia de Produção - Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria, 156 - bloco D - São Domingos, 24210-240 Niterói-RJ
duds704@yahoo.com.br

Lidia Angulo Meza

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense
Av. dos Trabalhadores, 420, 27255-125, Volta Redonda, RJ
lidia_a_meza@pq.cnpq.br

João Carlos Correia Baptista Soares de Mello

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal Fluminense
Rua Passo da Pátria 156, São Domingos, 24210-240, Niterói, RJ
jccbsmello@id.uff.br

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de avaliar as unidades portuárias brasileiras especializadas na operação exclusiva de contêineres. Para tanto, aplicou-se um modelo que combina Análise Envoltória de Dados e Programação Linear Multiobjetivo, conhecido como MCDEA (*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*). A versão aqui utilizada consiste em uma extensão do modelo original, pois considera a orientação radial a outputs, por ser mais compatível com o problema em análise. Para a geração das soluções não-dominadas, aplicou-se o *software* de apoio à decisão tri-objetivo, denominado TRIMAP. O uso do modelo MCDEA, embora tenha aumentado a discriminação entre as unidades analisadas, ainda resultou em multiplicadores nulos. Sendo assim, propôs-se um processo alternativo para o cálculo de multiplicadores não-nulos, por meio de programação por metas. Os resultados indicam que, no problema em questão, para se obter multiplicadores não-nulos, deve-se piorar ao menos um dos valores das funções objetivo, associados a alguma solução não-dominada.

PALAVRAS CHAVE. Eficiência portuária, Análise Envoltória de Dados, Programação por Metas.

Área principal: Análise Envoltória de Dados, Apoio à Decisão Multicritério.

ABSTRACT

This work aims to evaluate Brazilian port units specialized in the exclusive operation of containers. Therefore, we apply a model that combines Data Envelopment Analysis and Multiple Objective Linear Programming, known as MCDEA (Multiple Criteria Data Envelopment Analysis). The version used herein consists of an extension of the original model, since it considers a radial output orientation, regarded as more compatible with the problem under analysis. For the generation of non-dominated solutions, we applied a software intended to support tri-objective decision, called TRIMAP. The use of MCDEA model, although increasing the discrimination between the analyzed units, still resulted in null multipliers. Thus, we propose an alternative process for calculating non-null multipliers by means of goal programming. The results indicate that, in the problem under analysis, to obtain non-null multipliers, it is necessary to worsen at least one of the values of the objective functions associated with any non-dominated solution.

KEYWORDS. Port efficiency, Data Envelopment Analysis, Goal Programming.

Main area: Data Envelopment Analysis, Multiple Criteria Decision Support.

1. Introdução

Dada a relevância econômica da atividade portuária, a literatura dispõe de vários estudos que avaliam o desempenho do setor, como mostrado na Seção 2. Porém, devido às características distintas em termos de insumos e produção, que advêm, principalmente, da natureza diferenciada da carga operada, grande parte deles se restringe à análise de unidades especializadas, geralmente em contêineres. No Brasil, segundo a Agência Nacional de Transporte Aquaviário (ANTAQ), esse tipo de carga representou 10,5% de toda movimentação ocorrida em 2013.

Este trabalho tem o objetivo de avaliar as unidades portuárias brasileiras especializadas na operação exclusiva de carga em contêineres. Para tanto, usou-se um modelo baseado no introduzido por Li e Reeves (1999), conhecido como MCDEA (*Multiple Criteria Data Envelopment Analysis*). A formulação aqui adotada representa uma extensão do modelo MCDEA original, pois utiliza a orientação radial a *outputs*, por ser mais compatível com o problema em análise (veja, e.g., Acosta *et al.*, 2011; Bertoloto e Soares de Mello, 2011).

O modelo MCDEA incorpora duas funções objetivo ao modelo DEA tradicional, e seu emprego visa aumentar a capacidade de discriminação entre as poucas unidades que operam dentro do segmento em análise. Na geração das soluções não-dominadas do modelo MCDEA, usou-se o *software* TRIMAP (Clímaco e Antunes, 1987, 1989), que permite avaliação da decomposição do espaço dos pesos das funções objetivo. A partir dos resultados, determinou-se, para cada unidade portuária, o índice de eficiência MCDEA-TRIMAP (Soares de Mello *et al.*, 2006, 2009), aqui adaptado para a orientação a *outputs*. Além disso, para melhorar o esquema de multiplicadores, propôs-se um processo de cálculo baseado em programação por metas.

A Seção 2 traz uma breve revisão do uso de DEA na avaliação portuária. A Seção 3 revisita os modelos DEA tradicionais e apresenta o modelo MCDEA utilizado. Na Seção 4, detalha-se o uso conjunto do TRIMAP com o modelo MCDEA e a aplicação do índice MCDEA-TRIMAP para o modelo proposto, e propõe-se um novo procedimento para o cálculo dos multiplicadores. A Seção 5 descreve a modelagem do problema, e exhibe os resultados. Por fim, a Seção 6 compreende as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. DEA Aplicada à Avaliação Portuária

Roll e Hayuth (1993) conduziram um dos primeiros estudos a aplicar DEA na avaliação portuária. Usando um enfoque financeiro, Martínez-Budria *et al.* (1999) analisaram a eficiência de autoridades portuárias espanholas, enquanto que sob uma perspectiva operacional, Tongzon (2001) avaliou portos especializados em contêineres. Mais recentemente, Bichou (2012) usou DEA para avaliar diversos terminais de contêineres entre 2004 e 2010, levando em conta condições dinâmicas de mercado e operacionais. Para tanto, formulou algumas hipóteses operacionais, tendo mostrado que os resultados de eficiência são bastante sensíveis a pequenas mudanças estruturais. Outros exemplos de aplicações DEA restritas a terminais de contêiner podem ser vistos em Itoh (2002), Turner *et al.* (2004), Cullinane *et al.* (2005), Rios e Maçada (2006), González e Trujillo (2008), Hung *et al.* (2010), Jiang *et al.* (2012) e Yuen *et al.* (2013).

Sob uma ótica diferente, mas também limitados a terminais de contêineres, Caillaux *et al.* (2011) usaram um modelo DEA com *output* unitário para a seleção do porto de transbordo no âmbito do Mercosul. De forma similar a este estudo, Lozano e Villa (2009) avaliaram os portos espanhóis usando uma abordagem que combina DEA e programação linear multiobjetivo do tipo lexicográfico. Estudos destinados à avaliação do setor portuário brasileiro podem ser vistos, e.g., em Pires *et al.* (2009), Bertoloto e Soares de Mello (2011), Acosta *et al.* (2011), Cortez *et al.* (2013), Sousa Júnior *et al.* (2013) e Wanke (2013).

3. Modelos DEA Tradicionais e o MCDEA proposto

3.1. Aspectos Gerais

Os modelos DEA tradicionais são o CCR (Charnes *et al.*, 1978) e o BCC (Banker *et al.*, 1984). O CCR assume retornos constantes de escala, ou seja, qualquer variação nos *inputs* produz uma variação proporcional nos *outputs*. Já o BCC supõe retornos variáveis de escala, substituindo proporcionalidade por convexidade. Ambos dispõem de formulações equivalentes (envolpe e multiplicadores), que fornecem o mesmo resultado de eficiência para cada DMU, pois representam problemas duais. Em geral, para o cálculo de medidas radiais de eficiência, é possível adotar a orientação a *inputs*, que busca minimizar os recursos usados mantidos os níveis de produção; ou a *outputs*, que implica no aumento da produção sem que se alterem as quantidades de insumos empregadas. Aqui, será adotado o modelo CCR orientado a *outputs*.

Considerando um processo produtivo em que cada DMU_k (k = 1, ..., n) consome r *inputs* (i = 1, ..., r) para produzir s *outputs* (j = 1, ..., s), o modelo CCR orientado a *outputs*, na formulação dos multiplicadores, em sua forma habitual, é dado por (1a), onde θ denota o recíproco da medida de eficiência (i.e., $\theta = \frac{1}{\text{eficiência}}$) da DMU avaliada (DMU_o); u_j e v_i são, respectivamente, os multiplicadores dos *inputs* e *outputs*; u_0 e v_0 são, respectivamente, os *inputs* e *outputs* da DMU_o. Nesse caso, uma DMU é eficiente se, e somente se, $\theta = 1$.

Alternativamente, é possível definir a variável de folga $\tau_j = (u_j - \tau_j)$, e usá-la, de forma que a DMU_o seja eficiente se, e somente se, $\tau_j = 0$. Desse modo, o modelo CCR em sua forma habitual dada em (1a) pode ser reformulado como em (1b).

$$\begin{aligned} \text{Min } & \theta = \sum_{j=1}^s u_j y_{oj} \\ \text{s. a. } & \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} = 1 \\ & \sum_{i=1}^r v_i x_{ki} - \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} \leq 0, \forall k \\ & v_i, u_j \geq 0, \forall i, j \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } & \theta = \sum_{j=1}^s u_j y_{oj} \\ \text{s. a. } & \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} = 1 \\ & \sum_{i=1}^r v_i x_{ki} - \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} + \tau_j = 0, \forall k \\ & v_i, u_j, \tau_j \geq 0, \forall i, j \end{aligned} \quad (1b)$$

Pela segunda restrição de (1b), as folgas de cada DMU_k são dadas por $\tau_k = \sum_{j=1}^s u_j y_{kj} - \sum_{i=1}^r v_i x_{ki}$. Logo, para a DMU_o, e considerando a primeira restrição em (1a) e (1b), bem como a definição de θ , dada pela função objetivo em (1a), tem-se que $\tau_j = \theta - 1$, como já mencionado.

A partir de (1a) e/ou (1b), é possível observar o como cada DMU otimiza seu próprio conjunto de multiplicadores, de forma que sua eficiência seja a melhor possível em relação às demais. Isso denota a estrutura benevolente do método, que, por vezes, compromete sua capacidade de discriminação. O empate e/ou a grande quantidade de unidades eficientes ocorre, geralmente, quando o número de DMUs não é muito maior que o total de *inputs* e *outputs* usados na análise (Sexton *et al.*, 1986), tal como no estudo de caso a ser aqui analisado.

A baixa discriminação está associada, ainda, ao fato de os multiplicadores ótimos, usados para ponderar os *inputs* e *outputs* no cálculo da eficiência, poderem ser nulos. Isso soa contraditório, já que se espera usar todos os valores de *inputs* e *outputs* atribuídos às DMUs, para se obter uma medida de desempenho final (Ghasemi *et al.*, 2014).

Na literatura, há várias propostas que têm por objetivo aumentar a capacidade de discriminação em DEA, revisadas, por exemplo, em Angulo-Meza e Lins (2002). Dentre elas, destaca-se o modelo MCDEA, proposto por Li e Reeves (1999), que usa programação linear multiobjetivo para superar os problemas de baixa discriminação e promover uma melhor distribuição dos multiplicadores. O MCDEA se diferencia dos modelos DEA tradicionais na

medida em que propõe duas funções objetivo adicionais, além do objetivo DEA usual. Assim, ele tende a restringir os resultados obtidos pelas DMUs, pois reduz a flexibilidade na otimização.

A opção pelo MCDEA deve-se principalmente ao fato de que, diferentemente da maioria das abordagens alternativas, o este modelo permite que a alocação de multiplicadores ocorra de modo mais restrito, mas sem depender de opiniões de especialistas (Mecit e Alp, 2013). Embora não tenha sido encontrado registro de aplicação do modelo MCDEA em transporte aquaviário, seu uso para análise de eficiência em outras modalidades de transporte pode ser visto em Silveira *et al.* (2012) e Pereira *et al.* (2013). Já Bal e Örcü (2007), Bal *et al.* (2010) e Ghasemi *et al.* (2014) incorporam desenvolvimentos teóricos ao MCDEA original.

3.2. Formulação do modelo MCDEA orientado a *outputs*

Neste trabalho, dada a natureza do problema em análise, onde os *inputs* denotam a infraestrutura das unidades portuárias e o *output* indica a quantidade de carga movimentada (vide Seção 5), o uso da orientação a *input* não seria adequado. Com isso, fez-se necessária a formulação do modelo MCDEA orientado a *outputs*, diferentemente do original de Li e Reeves (1999), que se baseia na formulação dos multiplicadores para o modelo CCR, mas usa a orientação a *inputs*. Assim, as duas funções objetivo adicionais do modelo MCDEA original foram incorporadas a (1b). Elas compreendem a minimização da folga máxima (minimax) e a minimização da soma das folgas (minisoma). Logo, o modelo MCDEA orientado a *outputs* é dado por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \\
 & \text{Min} \\
 & \text{Min } \sum_{k=1}^n d_k \\
 & \text{s. a. } \sum_{k=1}^n d_k = 1 \\
 & \quad (2) \\
 & \sum_{k=1}^n d_k - \sum_{k=1}^n d_k + \dots = 0, \forall \\
 & \quad - \geq 0, \forall \\
 & \quad , , \geq 0, \forall , ,
 \end{aligned}$$

Em (2), o M na segunda função objetivo (minimax) denota o máximo de todas as folgas d_k ($k = 1, \dots, n$), e a introdução da terceira restrição (i.e., $- \geq 0, \forall$) não altera a região viável de solução, só assegura que ≥ 0 . Na avaliação dos resultados, uma DMU é “minimax” eficiente se, e somente se, o valor d_o referente à solução que maximiza a segunda função objetivo do modelo é nulo. Analogamente, uma DMU é “minisoma” eficiente se, e somente se, o valor d_o correspondente à solução que maximiza a terceira função objetivo em (2) é nula. Portanto, quando uma DMU é “minimax” ou “minisoma” eficiente, também deve ser eficiente no sentido DEA tradicional, uma vez que, por definição, as eficiências “minimax” e “minisoma” requerem $d_o = 0$.

4. O uso do TRIMAP na resolução do MCDEA

Em um problema multiobjetivo, a dificuldade reside em encontrar uma solução que otimize simultaneamente todos os objetivos, já que, na maioria dos casos, não há solução ótima no espaço das soluções viáveis que atenda tal condição, sendo necessário recorrer a um conjunto de soluções não-dominadas (veja, e.g., Clímaco *et al.*, 2003). Aqui, tal como em Clímaco *et al.* (2008), na resolução dos modelos MCDEA será usado o *software* TRIMAP (Clímaco e Antunes, 1987, 1989). Exemplos de aplicações do TRIMAP em um contexto MCDEA podem ser vistos em Pereira *et al.* (2013), Silveira *et al.* (2012) e Soares de Mello *et al.* (2006, 2009).

4.1. Índice MCDEA-TRIMAP

Desenvolvido por Soares de Mello *et al.* (2006, 2009), o índice de eficiência MCDEA-TRIMAP considera as propriedades decorrentes do uso do TRIMAP para a resolução do modelo MCDEA, visto que a escolha dos multiplicadores de cada DMU depende da atribuição de pesos a cada função objetivo, pesos estes que podem variar dentro de uma região de indiferença.

Sendo assim, Soares de Mello *et al.* (2006, 2009) partem do princípio de que no cômputo do índice toda uma infinidade de combinações possíveis dos pesos das funções objetivo deve ser considerada, além do fato de os valores assumidos pela primeira função objetivo (eficiência DEA tradicional) variarem continuamente no espaço dos pesos. Desse modo, o índice integra a primeira função objetivo, considerando todo o espaço viável dos pesos, quando a soma ponderada das três funções objetivo é otimizada. A divisão desse resultado pelo tamanho do espaço viável dos pesos fornece o valor médio da primeira função objetivo naquele espaço. Logo, a fórmula original do índice MCDEA-TRIMAP, baseada em um modelo orientado a *inputs*, é dada por:

$$FO_1 = 1 - \frac{\int_{\Delta} (1 - \lambda_1 - \lambda_2 - \lambda_3) d\lambda_1 d\lambda_2 d\lambda_3}{\Delta} \quad (3)$$

onde FO_1 é o valor assumido pela primeira função objetivo (DEA tradicional), na região de indiferença; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ são os pesos da primeira, segunda e terceira função objetivo, respectivamente; e Δ denota o espaço dos pesos das funções objetivo. Porém, em (3), dada a orientação a *inputs*, $\lambda_1 = 1 - \lambda_2 - \lambda_3$.

Neste trabalho, como é usada a orientação a *outputs*, o valor médio apurado para primeira função objetivo deve ser transformado de forma distinta, para representar uma medida de eficiência. Isso porque, sob tal orientação, a primeira função objetivo em (2) denota o complemento do recíproco da eficiência (i.e., $\lambda_1 = \frac{1}{\theta} - 1 = \frac{1}{\theta} - 1$), de tal forma que

$\lambda_1 = \frac{1}{\theta} - 1$. Assim, o índice MCDEA-TRIMAP, aqui adaptado para o caso de orientação a *outputs*, é dado por:

$$FO_1 = \int_{\Delta} (\lambda_1 + 1)^{-1} \frac{d\lambda_1 d\lambda_2 d\lambda_3}{\Delta} \quad (4)$$

Como discutido em Soares de Mello *et al.* (2006, 2009), sob certas condições, para o cômputo de (4), basta calcular a soma ponderada da transformação da primeira função objetivo, usando como ponderadores os percentuais da área em que cada solução é válida. Contudo, um ajuste deve ser feito no modelo em (2), dividindo-se a função objetivo “minisoma” pelo total de DMUs em análise, como proposto pelos mesmos autores. Com isso, a terceira função objetivo em (2) passa a ser dada por $Min \sum_{j=1}^n x_j$, aqui referida como “minimédia”. Tal mudança não altera as soluções não-dominadas, apenas as áreas das regiões de indiferença de pesos a elas associadas.

4.2. Cálculo dos multiplicadores

Soares de Mello *et al.* (2006) propõem um processo de cálculo para os multiplicadores, em que se resolve um problema de programação linear originado no modelo DEA tradicional, igualando-se a eficiência ao valor apurado para o índice MCDEA-TRIMAP. Mas, como tal valor denota a média ponderada das eficiências DEA de cada solução não-dominada, via de regra, ele não representa uma solução não-dominada em si.

Uma alternativa consiste em recorrer à programação por metas (Lee, 1972; Ignizio, 1976), tipo de programação multiobjetivo em que se renuncia à otimização em prol de uma

solução que melhor satisfaça os níveis de aspiração manifestos *a priori* pelo decisor. Na abordagem básica, transforma-se cada objetivo em meta, definindo um nível de aspiração para cada uma, para, então, buscar a solução que minimiza a função de realização, em geral, dada pela soma ponderada dos desvios indesejáveis entre os níveis de aspiração e suas respectivas metas.

Todavia, a proposta apresentada a seguir, adota um enfoque multimetas (Zeleny, 1982; Romero, 1993), onde a cada meta é associada uma função de realização que minimiza os desvios indesejáveis. Desse modo, o processo dado em (5) busca obter multiplicadores não-nulos para os *inputs*, definindo como níveis de aspiração para os objetivos MCDEA os respectivos valores das soluções não-dominadas, e para os multiplicadores dos *inputs* um valor mínimo pré-fixado.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \lambda_1 + \lambda_1 \\
 & \text{Min } \lambda_2 + \lambda_2 \\
 & \text{Min } \lambda_3 + \lambda_3 \\
 & \text{Min } \lambda_4 \\
 & \dots \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \\
 & \sum_{i=1}^n \lambda_i - \sum_{i=1}^n \lambda_i + \epsilon = 0, \forall \\
 & (5) \\
 & - \lambda_i \geq 0, \forall \\
 & - \lambda_i \leq 0, \forall \\
 & + \lambda_1 - \lambda_1 = \lambda_1^* \\
 & + \lambda_2 - \lambda_2 = \lambda_2^* \\
 & \dots \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i \right) + \lambda_4 - \lambda_4 = \lambda_3^* \\
 & + \lambda_4 - \lambda_4 = \\
 & \lambda_1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \geq 0
 \end{aligned}$$

Em (5), $\lambda_1, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_2, \lambda_3$ e λ_3 são, respectivamente, os desvios indesejáveis para as metas da primeira, segunda e terceira função objetivo em (2); λ_1^*, λ_2^* e λ_3^* são os valores das respectivas funções objetivo associados à alguma solução não-dominada obtida pelo TRIMAP e usados como níveis de aspiração nas metas correspondentes; e ϵ é um valor não-nulo usado como nível de aspiração na meta para os multiplicadores dos *inputs* (e.g., aqui $\epsilon=0,01$).

5. Modelagem e Resultados

Neste trabalho, aplicar-se-á o modelo MCDEA em (2), o qual se baseia na formulação CCR, e considera a orientação a *output*. A mesma orientação, embora com a formulação BCC, foi também usada em Acosta *et al.* (2011) e Bertoloto e Soares de Mello *et al.* (2011). O uso do CCR pode ser justificado por não se desejar beneficiar as unidades que operam fora da escala ótima. Além disso, o pequeno número de unidades no conjunto de análise tende a impedir uma melhor discriminação ao se recorrer ao BCC, ainda que sob um contexto MCDEA.

As DMUs são as unidades portuárias brasileiras, em atividade no ano de 2013, que operaram exclusivamente carga em contêineres. A análise conjunta de todas as unidades que compõem o complexo portuário brasileiro violaria o pressuposto de homogeneidade necessário para a aplicação de modelos DEA, uma vez que há grupos de unidades que não trabalham exatamente no mesmo negócio, ou seja, operam cargas de natureza diferente, o que pode gerar distorções no resultado (Cook *et al.*, 2013). Por essa razão, optou-se por analisar tão-somente as

unidades especializadas na movimentação exclusiva de carga em contêineres.

Para medir a eficiência operacional dessas unidades, quanto à movimentação de carga, foram considerados os *inputs* “extensão de cais acostável”, “calado máximo” e “área de armazenagem”, tal como em Acosta *et al.* (2011). Como *output* considerou-se a quantidade total de carga em contêineres movimentada pela unidade portuária, em TEUs (*Twenty-Foot Equivalent Unit*, ou unidade equivalente a vinte pés).

Os dados do *output* foram obtidos no sítio da ANTAQ, já os dos *inputs* nos sítios das próprias unidades portuárias analisadas. A Tabela 1 exibe a base de dados utilizada. A partir da Tabela 1, observa-se que no sistema portuário brasileiro, há apenas quatro unidades especializadas na operação exclusiva de carga em contêineres e todas são TUPs (terminais de uso privado). Essas unidades movimentaram cerca de 18% da tonelagem total de carga em contêiner operada no país em 2013. Nota-se, ainda, que tais unidades estão concentradas (75%) nas regiões Sul e Sudeste. No caso do TUP Embraport, cabe realçar que ele começou a operar somente em julho de 2013.

Para evitar distorções, decorrentes dos diferentes intervalos de variação de cada *input/output*, e permitir uma análise mais consistente dos multiplicadores, os dados da Tabela 1 foram normalizados, e os resultados reportados foram obtidos a partir deles.

É importante ressaltar que o uso do CCR em conjunto com o *input* “calado máximo”, tal como aqui proposto, é discutível, uma vez que a quantidade de carga movimentada (*output*) não é proporcional ao calado (vide Tabela 1). No entanto, como a variação de calado é pequena entre as DMUs avaliadas, a imprecisão advinda do uso do CCR é preferível às desvantagens associadas ao BCC (Maciel *et al.*, 2014; Sousa Júnior *et al.*, 2013).

Tabela 1 – *Inputs e outputs* das unidades portuárias que operaram exclusivamente carga em contêineres, em 2013

Nome da Instalação	UF	DMU	Extensão de cais acostável (m)	Calado máximo (m)	Área de armazenagem (1.000m ²)	Carga movimentada (milhares de TEUs)
			<i>Input1</i>	<i>Input2</i>	<i>Input3</i>	<i>Output1</i>
TUP Chibatão	AM	DMU1	450	11,5	1.000	362,710
TUP Embraport	SP	DMU2	653	13,2	207	196,314
TUP Porto Itapoá	SC	DMU3	630	16,0	150	465,323
TUP Portonave	SC	DMU4	900	11,3	270	686,024

Aqui, como o número de DMUs em análise é igual ao total de *inputs e output* avaliados, o modelo DEA tradicional não é capaz de discriminar as DMUs adequadamente. A Tabela 2 exibe os resultados obtidos a partir do *software* SIAD (Angulo-Meza *et al.*, 2005), usando-se o modelo CCR tradicional, orientado a *output*, descrito em (1a). Nota-se que foram atribuídos multiplicadores nulos às DMUs 1, 2 e 3 para o *input* “calado máximo” e à DMU4 para os *inputs* “extensão de cais” e “área de armazenagem”, com reflexo nos resultados de eficiência (3 das 4 DMUs resultaram eficientes). A única DMU ineficiente (39%) foi o TUP Embraport (DMU2). Um fator que muito provavelmente contribuiu para esse baixo resultado é o fato desse terminal ter iniciado suas operações apenas em julho.

Tabela 2 – Multiplicadores e eficiências obtidas a partir do modelo CCR tradicional

DMU	v_1	v_2	v_3	u_1	Ef
DMU1	1,87445	0	0,06278	1,89140	1
DMU2	3,46323	0	0,11599	3,49455	0,39420

DMU3	1,25271	0	0,82069	1,47430	1
DMU4	0	1,41593	0	1	1

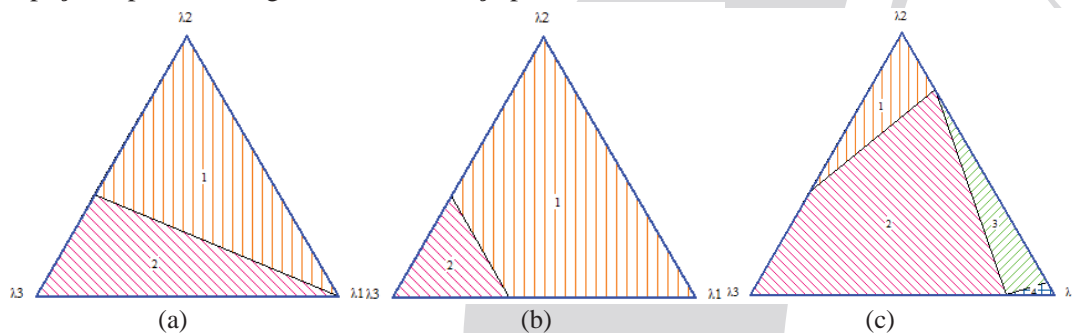
Com o propósito de aumentar a discriminação entre as DMUs e melhorar esquema de multiplicadores, aplicar-se-á o modelo MCDEA em (2). Para o cômputo do índice de eficiência MCDEA-TRIMAP/O em (4), a terceira função objetivo do modelo em (2) foi transformada para “minimédia” (vide Subseção 4.1). O problema dado em (6) representa o modelo MCDEA em (2) aplicado para a avaliação da DMU1 (TUP Chibatão), com a terceira função objetivo já transformada em “minimédia”. Para as demais DMUs, o problema difere apenas pelas primeiras função objetivo e restrição, que devem ser substituídas pelas correspondentes à DMU em análise.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \theta \\
 & \text{Min } \frac{(\theta + \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4)}{4} \\
 & \text{s. a. } 0,52871 \theta = 1 \\
 & 0,52871 \theta - 0,5 \theta_1 - 0,71875 \theta_2 - \theta_3 + \theta_4 = 0 \\
 & 0,28616 \theta - 0,72556 \theta_1 - 0,825 \theta_2 - 0,207 \theta_3 + \theta_4 = 0 \\
 & 0,67829 \theta - 0,7 \theta_1 - \theta_2 - 0,15 \theta_3 + \theta_4 = 0 \\
 & 1 \theta - 0,70625 \theta_1 - 0,27 \theta_2 - \theta_3 + \theta_4 = 0
 \end{aligned} \quad (6)$$

- $\theta_1 \geq 0$
- $\theta_2 \geq 0$
- $\theta_3 \geq 0$
- $\theta_4 \geq 0$

$$\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4 \geq 0$$

Conforme explicado na Seção 4, usou-se o *software* TRIMAP Windows version 1.01 para a obtenção de soluções não-dominadas para cada DMU. A Figura 1 exibe a decomposição do espaço de pesos em regiões de indiferença para cada DMU.



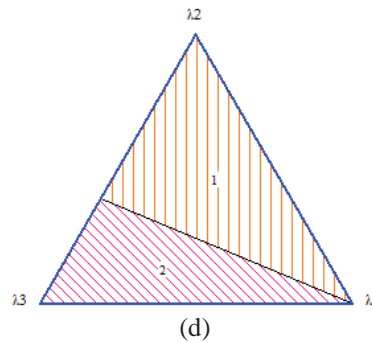


Figura 1 – Decomposição do espaço de pesos para (a) DMU1, (b) DMU2, (c) DMU3 e (d) DMU4

A Tabela 3 apresenta os resultados de eficiência obtidos para cada solução não-dominada e os respectivos índices de eficiência MCDEA-TRIMAP, calculados conforme (4). Os resultados das DMUs 1, 2 e 4 são iguais às eficiências exibidas na Tabela 2. Já para a DMU3 são obtidos resultados de eficiência alternativos, sendo que, apenas em uma pequena área da região de indiferença (0,68%) ela atinge a eficiência unitária. Com isso, o índice MCDEA-TRIMAP para a DMU3 foi inferior a 1. Logo, pode-se afirmar que, neste estudo, o modelo MCDEA combinado ao índice MCDEA-TRIMAP de fato aumentou o poder de discriminação, reduzindo o número de DMUs eficientes de 3 para 2.

Tabela 3 – Resultados de eficiência para as soluções não-dominadas e índices MCDEA-TRIMAP

DMU		Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	$Ef_{MCDEA-TRIMAP/O}$
DMU1	$Ef=1/(1+FO1)$	1	1			1
	Área (%)	61,4072	38,5928			
DMU2	$Ef=1/(1+FO1)$	0,394199	0,394199			0,39420
	Área (%)	85,106	14,894			
DMU3	$Ef=1/(1+FO1)$	0,970781	0,970781	0,999514	1	0,97430
	Área (%)	13,604	74,1676	11,5507	0,677686	
DMU4	$Ef=1/(1+FO1)$	1	1			1
	Área (%)	61,4072	38,5928			

A Tabela 4 exibe o esquema de multiplicadores para a solução que resulta no maior valor de eficiência apurado para a respectiva DMU (solução 1 para as DMUs 1, 2 e 4; e solução 4 para a DMU3). No caso das DMUs 1, 2 e 3, os multiplicadores são idênticos aos reportados na Tabela 2. Contudo, para a DMU4, embora tenham deixado de ser atribuídos multiplicadores nulos para os *inputs* “extensão do cais” e “área de armazenagem”, o multiplicador do *input* “calado máximo” passou a ser nulo. Com isso, todas as DMUs passaram a não considerar o *input* “calado máximo” no cômputo da eficiência.

Tabela 4 – Multiplicadores para a solução que resulta no valor máximo de eficiência exibido na Tabela 3

DMU	v_1	v_2	v_3	u_1	Ef_{max}
DMU1	1,87445	0	0,06278	1,89140	1
DMU2	3,46323	0	0,11599	3,49455	0,39420
DMU3	1,25271	0	0,82069	1,47430	1
DMU4	0,99104	0	0,03319	1	1

Para verificar a possibilidade de se obter multiplicadores não-nulos associados a uma

solução não-dominada, aplicou-se a cada uma das DMUs, o problema dado em (5), que recorre à programação por metas buscando igualar os valores obtidos pelas três funções objetivos nas soluções não-dominadas, e ao mesmo tempo superar um limite mínimo pré-fixado para os valores dos multiplicadores dos *inputs*.

Como o problema em (5) implica a tentativa de otimização de quatro funções de realização (minimização dos desvios indesejáveis), na sua implementação, usou-se o *software* iMOLPe, em vez do TRIMAP, pois este é limitado a três funções objetivos. Usando uma abordagem tradicional de programação por metas, o problema seria convertido em monoobjetivo, já que seria solucionado pela minimização da soma ponderada dos desvios indesejáveis. Isso coincidiria com as soluções a seguir apresentadas, que obtidas usando o método da ponderação com $w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 1$. Entretanto, a formulação aqui adotada facilita a visualização das metas não-atingidas. A Tabela 5 apresenta as soluções não-dominadas para o problema multiobjetivo de programação por metas em (5) aplicado a cada uma das DMUs em análise.

Na Tabela 5, nota-se que para nenhuma das DMUs foi possível atingir todas as metas conjuntamente. Em alguns casos, como o da DMU3, atingiu-se no máximo três metas. Contudo, para todas as DMUs, foi possível obter ao menos um esquema de multiplicadores não-nulos, ainda que tais multiplicadores não correspondam exatamente a uma solução MCDEA não-dominada.

Tabela 5 – Soluções não-dominadas obtidas para o problema multimetas em (5)

	TRIMA P	iMOLP e	f_1	f_2	f_3	f_4	v_1	v_2	v_3
DMU1	1=2	1	0	0,046	0,031	0,0	1,787	0,149	0
		2	0	0,007	0,201	0	1,861	0,023	0,053
		3	0	0,038	0,063	0	1,801	0,125	0,01
DMU2	1=2	1	1,9E-6	0,257	0,431	0,0	3,463	0	0,116
		2	0,013	0,013	0,373	0	3,438	0,042	0,098
		3	0,085	0,085	0,057	0,0	3,301	0,274	0
DMU3	1=2	1	0,031	0	0,038	0,0	0,945	0,079	0
		2	0,051	0	0	0,0	1,084	0	0
		3	0,168	0	0	0	0,995	0,03	0,01
		1	0,061	0	0,197	0,0	0,944	0,945	0
		2	0,231	0	0,001	0,0	1,3	0	0
	3	3	0,232	0,001	0	0,0	1,301	0	0
		4	0,345	0	0	0	1,234	0,01	0,01
		1	0,061	0	0,2	0,0	0,945	0,079	0
		2	0,235	0	0	0,0	1,305	0	0
		3	0,348	0	0	0	1,238	0,01	0,01
DMU4	1=2	1	0	0,244	0,079	0,0	1,393	0,12	0
		2	0	0,214	0,212	0	1,451	0,018	0,041
		3	0	0,237	0,111	0	1,407	0,092	0,01

6. Conclusões

Neste trabalho, avaliou-se as unidades portuárias brasileiras especializadas na operação exclusiva de carga em contêineres, usando uma adaptação do modelo MCDEA para o caso de orientação a *outputs*. Na resolução do modelo MCDEA, usou-se o *software* TRIMAP, tendo sido calculado, ainda, o índice de eficiência MCDEA-TRIMAP, cuja aplicação também foi adaptada para a orientação a *outputs*.

O recurso ao MCDEA, embora tenha melhorado a discriminação entre as unidades analisadas, ainda resultou em multiplicadores nulos. Diante disso, foi proposto um processo alternativo para o cálculo de multiplicadores não-nulos, usando um enfoque de programação por metas, em que se igualaram os níveis de aspiração de cada meta correspondente aos objetivos MCDEA, aos valores encontrados em cada uma das soluções não-dominadas, bem como fixou-se um nível de aspiração para o mínimo dos multiplicadores dos *inputs*. Os resultados indicam que, neste estudo de caso, para se obter multiplicadores não-nulos, deve-se piorar ao menos um dos

valores das funções objetivo associados a alguma solução não-dominada, recorrendo-se, assim a uma solução MCDEA não eficiente do ponto de vista de Pareto, ainda que os desvios de eficiência sejam pouco significativos.

Em trabalhos futuros, pretende-se considerar outros enfoques de programação por metas no cálculo dos esquemas de multiplicadores alternativos (e.g., a ordenação lexicográfica das funções de realização ou a maximização do menor dos desvios indesejados). Outra possibilidade seria transformar uma ou algumas das metas do modelo em funções objetivos (e.g., a maximização da eficiência DEA tradicional poderia deixar de ser uma meta e tornar-se função objetivo). É possível desenvolver, ainda, um modelo de programação por metas, similar ao proposto, mas desvinculado do TRIMAP, em que os níveis de aspiração de cada função de realização deixariam de ser equivalentes aos valores encontrados em cada solução do TRIMAP, para serem valores que atendam as preferências do decisor ou mesmo os valores “ideais” de eficiência para as três funções objetivo.

Referências

- Acosta, C.M.M., Silva, A.M.V.A. e Lima, M.L.P.D. (2011), Aplicação de análise envoltória de dados (DEA) para medir eficiência em portos brasileiros, *Journal of Transport Literature*, 5, 88-102.
- Angulo-Meza, L. e Lins, M.P.E. (2002), Review of methods for increasing discrimination in data envelopment analysis, *Annals of Operations Research*, 116, 225-242.
- Angulo-Meza, L., Biondi Neto, L., Soares de Mello, J.C.C.B. e Gomes, E.G. (2005), ISYDS - Integrated System for Decision Support (SIAD - Sistema Integrado de Apoio a Decisão): A software package for data envelopment analysis model, *Pesquisa Operacional*, 25, 493-503.
- Bal, H. e Örkücü, H.H. (2007), A Goal Programming approach to weight dispersion in Data Envelopment Analysis, *Gazi University Journal of Science*, 20, 117-125.
- Bal, H., Örkücü, H.H. e Çelebioglu, S. (2010), Improving the discrimination power and weights dispersion in the data envelopment analysis, *Computers and Operations Research*, 37, 99-107.
- Banker, R.D., Charnes, A. e Cooper, W.W. (1984), Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis, *Management Science*, 30, 1078-1092.
- Barros, C.P. e Athanassiou, M. (2004), Efficiency in European seaports with DEA: evidence from Greece and Portugal, *Maritime Economics and Logistics*, 6, 122-140.
- Barros, C.P. (2006), A benchmark analysis of Italian seaport using data envelopment analysis, *Maritime Economics and Logistics*, 8, 347-365.
- Bertoloto, R.F. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2011), Eficiência de portos e terminais privados brasileiros com características distintas, *Journal of Transport Literature* 5, 4-21.
- Bichou, K. (2012), An empirical study of the impacts of operating and market conditions on container-port efficiency and benchmarking, *Research in Transportation Economics*, 42, 28-37.
- Caillaux, M.A., Sant'anna, A.P., Angulo-Meza, L. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2011), Container logistics in Mercosur: choice of a transshipment port using ordinal Copeland method, data envelopment analysis and probabilistic composition, *Maritime Economics and Logistics*, 13, 355-370.
- Charnes, A., Cooper, W.W. e Rhodes, E. (1978), Measuring the Efficiency of Decision Making Units, *European Journal of Operational Research*, 2, 429-444.
- Clímaco, J.C.N. e Antunes, C.H. (1987), TRIMAP an interactive tricriteria linear programming package, *Foundations of Control Engineering*, 12, 101-119.
- Clímaco, J.C.N. e Antunes, C.H. (1989), Implementation of a user-friendly software package - A guided tour of TRIMAP, *Mathematical and Computer Modelling*, 12, 1299-1309.

- Clímaco, J.C.N., Antunes, C.H. e Alves, M.J., *Programação Linear Multiobjectivo*, Imprensa da Universidade de Coimbra, Portugal, 2003.
- Clímaco, J.C.N., Soares de Mello, J.C.C.B. e Angulo-Meza, L., Performance Measurement - From DEA to MOLP, em F. Adam e P. Humphreys (Eds.), *Encyclopedia of Decision Making and Decision Support Technologies*, 709-715, Information Science Reference, EUA, 2008.
- Cook, W.D., Harrison, J., Imanirad, R., Rouse, P. e Zhu, J. (2013), Data Envelopment Analysis with Nonhomogeneous DMUs, *Operations Research*, 61, 666-676.
- Cortez, L.C.S., Oliveira, L.R.D., Martins, E.F., Jesus, I.R.D.D. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2013), Análise de eficiência na gestão de portos públicos brasileiros em relação ao papel das autoridades portuárias, *Journal of Transport Literature*, 7, 78-96.
- Cullinane, K., Song, D.W. e Wang, T.F. (2005), The application of mathematical programming approaches to estimating container port production efficiency, *Journal of Productivity Analysis*, 24, 73-92.
- Ghasemi, M.R., Ignatius, J. e Emrouznejad, A. (2014), A bi-objective weighted model for improving the discrimination power in MCDEA, *European Journal of Operational Research*, 233, 640-650.
- González, M.M. e Trujillo, L. (2008), Reforms and infrastructure efficiency in Spain's container ports, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42, 243-257.
- Hung, S., Lu, W. e Wang, T. (2010), Benchmarking the operating efficiency of Asia container ports, *European Journal of Operational Research*, 203, 706-713.
- Ignizio, J.P., *Goal programming and extensions*, Lexington Books, EUA, 1976.
- Itoh, H. (2002), Efficiency changes at major container ports in Japan: A window application of DEA, *Review of Urban and Regional Development Studies*, 14, 133-152.
- Jiang, J.L., Chew, E.P., Lee, L.H. e Sun, Z. (2012), DEA based on strongly efficient and inefficient frontiers and its application on port efficiency measurement, *OR Spectrum*, 34, 943-969.
- Lee, S.M., *Goal programming for decision analysis*, Auerback, EUA, 1972.
- Li, X.-B. e Reeves, G.R. (1999), A multiple criteria approach to data envelopment analysis, *European Journal of Operational Research*, 115, 507-517.
- Maciel, G.S., Lima, G.B.A., Angulo-Meza, L. e Gomes Júnior, S.F. (2014), Avaliação de processos licitatórios de embarcações de apoio marítimo offshore com utilização de análise envoltória de dados, *Journal of Transport Literature*, 8, 329-349.
- Martinez-Budria, E., Armas, R.D., Ibanez, M.N. e Mesa, R. (1999), A study of the efficiency of Spanish port authorities using data envelopment analysis, *International Journal of Transport Economics*, 26, 237-253.
- Mecit, E.D. e Alp, I. (2013), A new proposed model of restricted data envelopment analysis by correlation coefficients, *Applied Mathematical Modelling*, 37, 3407-3425.
- Pereira, E.R., Chaves, M.C.C. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2013), Evaluation of efficiency of Brazilian airlines using the MCDEA-TRIMAP model, *Proceedings of the 2nd ICORES*, 213-221.
- Pires, L.S., Bertoloto, R.F. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2009), Análise da eficiência de portos de carregamento de minério de ferro, *Rio's International Journal on Sciences of Industrial and Systems Engineering and Management*, 3, pe094-01.
- Rios, L.R. e Maçada, A.C.G. (2006), Analysing the relative efficiency of container terminals of Mercosur using DEA, *Maritime Economics and Logistics*, 8, 331-346.
- Roll, Y. e Hayuth, Y. (1993), Port performance comparison applying DEA, *Maritime Policy and Management*, 20, 153-161.
- Romero, C., *Teoria de la decisión multicriterio: Conceptos, técnicas y aplicaciones*, Alianza Editorial, Espanha, 1993.

- Sexton, T.R., Silkman, R.H. e Hogan, A.J. Data Envelopment Analysis: critique and extensions, em R.H. Silkman (Ed.), *Measuring efficiency: an assessment of data envelopment analysis*, 73-105, Jossey-Bass, EUA, 1986.
- Silveira, J.Q., Soares de Mello, J.C.C.B. e Angulo-Meza, L. (2012), Evaluación de la eficiencia de las compañías aéreas brasileñas a través de un modelo híbrido de análisis envolvente de datos (DEA) y programación lineal multiobjetivo, *Ingeniare*, 20, 331-342.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Clímaco, J.C.N. e Angulo-Meza, L. (2006), Índice de eficiência MCDEA-TRIMAP, Atas do XXXVIII SBPO, 294-305.
- Soares de Mello, J.C.C.B., Clímaco, J.C.N. e Angulo-Meza, L. (2009), Efficiency evaluation of a small number of DMUs: an approach based on Li and Reeves's model, *Pesquisa Operacional*, 29, 97-110.
- Sousa Júnior, J.N.C., Nobre Júnior, E.F., Prata, B.A. e Soares de Mello, J.C.C.B. (2013), Avaliação da eficiência dos portos utilizando análise envoltória de dados: estudo de caso dos portos da região nordeste do Brasil, *Journal of Transport Literature*, 7, 75-106.
- Tongzon, J. (2001), Efficiency measurement of selected Australian and other international ports using data envelopment analysis, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35, 107-122.
- Turner, H., Windle, R. e Dresner, M. (2004), North American container port productivity, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 40, 339-356.
- Wanke, P.F. (2013), Physical infrastructure and shipment consolidation efficiency drivers in Brazilian ports: a two-stage network-DEA approach, *Transport Policy*, 29, 145-153.
- Yuen, A.C., Zhang, A. e Cheung, W. (2013), Foreign participation and competition: A way to improve the container port efficiency in China?, *Transportation Research Part A*, 49, 220-231.
- Zeleny, M., *Multiple Criteria Decision Making*, Mc-Graw-Hill, EUA, 1982.