

MODELO MATEMÁTICO DE TRANSPORTE PARA AVALIAÇÃO DOS GANHOS ECONÔMICOS NO TRANSPORTE HIDROVIÁRIO E DUTOVIÁRIO DE ETANOL

Roberto Fray da Silva¹
Thiago Guilherme Péra²
Daniela Bartholomeu Bacchi²
José Vicente Caixeta Filho²
Carlos Eduardo Cugnasca¹

¹Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

²Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo
Grupo de Pesquisa e Extensão em Logística Agroindustrial (ESALQ-LOG)

RESUMO

O presente artigo desenvolve um modelo de transporte que busca minimizar os custos do escoamento do etanol anidro e do etanol hidratado a partir de cinco cenários com diferentes graus de participação de modais atualmente não utilizados, os modais hidroviário e dutoviário, na matriz de transportes da região Centro-Sul do país. As principais justificativas para o uso destes modais são relacionadas a aspectos econômicos, como redução no custo do frete, e ambientais, como redução na emissão de Gases do Efeito Estufa. O modelo foi programado e processado no software *General Algebraic Modeling System*, utilizando o *solver* CPLEX. Dentre os resultados obtidos, destaca-se que a introdução de dutovias e hidrovias no sistema de transporte da região estudada pode gerar economias significativas nos custos de transporte destes produtos, da ordem de 30% no caso de etanol hidratado e 14% no caso de etanol anidro. As principais limitações do trabalho dizem respeito a escolhas para simplificar o modelo: não considerar custos de armazenagem e processamento de pedidos, o investimento inicial em infraestrutura e a competição com outros produtos no uso da hidrovia. Trabalhos futuros dizem respeito a ampliar o modelo considerando estes fatores, e a influência de produtos concorrentes no uso dos modais alternativos.

ABSTRACT

This paper develops a transportation model to minimize ethanol transportation costs in the Center-South region of Brazil, considering both anhydrous and hydrous ethanol. Five scenarios will be considered, varying the participation on the ethanol transportation matrix of the currently not used alternative transportation modes, waterways and pipelines. The importance of these modes is related both to economic aspects, such as the reduction in transportation costs, and to environmental aspects, such as reduction on Greenhouse Effect Gases. The mathematical model was developed and processed using the software *General Algebraic Modeling System*, with the CPLEX solver. The main results are that the use of waterways and pipelines in this supply chain may lead to a reduction of 30% of the transportations costs for hydrous ethanol, and 14% for anhydrous ethanol. The main limitations of this paper are related to choices made to simplify the model: not considering storage and ordering costs, the initial investment in infrastructure and the competition with other products to use the waterways. Future research is related to: consider these factors and the effect of other products on the use of alternative transportation modes.

1. INTRODUÇÃO

Os biocombustíveis podem ser descritos como substitutos dos combustíveis fósseis que são produzidos a partir de biomassa vegetal, sendo que as principais matérias-primas são cana-de-açúcar, milho, soja e resíduos vegetais (Akgul et al, 2012). Algumas das principais razões que influenciam o atual crescimento na demanda por biocombustíveis são: uma maior preocupação com os impactos ambientais do uso de combustíveis fósseis e uma insegurança relacionada ao suprimento de petróleo e seus derivados. Dentre os mais importantes biocombustíveis podem-se destacar o biodiesel e o etanol.

O etanol é um produto da cadeia agroindustrial de grande importância para o Brasil, sendo

que na safra 2012/2013 foram produzidos cerca de 23 milhões de m³, um crescimento de 2% em relação à safra anterior (UNICA, 2013). Junginger et al (2008) classificam o Brasil como o país mais importante na cadeia de suprimentos global de etanol, devido ao volume produzido e consumido pelo mesmo.

A Região Centro-Sul corresponde a 92% da produção total de etanol do Brasil, sendo que somente o estado de São Paulo é responsável por 51% do etanol produzido no país. Por esta razão, a Região Centro-Sul será o foco do presente estudo.

Com relação a seu consumo, o etanol pode ser tanto exportado quanto utilizado no mercado interno. Em 2012, um total de 3,1 milhões de m³ foi exportado, no valor de US\$ 2,2 milhões FOB. O mercado interno possui maior importância para este produto, correspondendo ao destino de cerca de 86% do etanol produzido em 2012 (MDIC/SECEX, 2013). O etanol para mercado interno é comercializado de duas formas: etanol hidratado, que é utilizado diretamente como combustível em carros movidos a etanol ou *flex-fuel*, e etanol anidro, que é misturado à gasolina. O etanol hidratado correspondeu, em 2012, a 60% do consumo de etanol na Região Centro-Sul (UNICA, 2013, ANP, 2013).

Por ser um produto de baixo valor agregado, a gestão da cadeia de suprimentos do etanol, área responsável pelos planejamentos estratégico, tático e operacional da movimentação do produto e da interação entre os diferentes elos da cadeia, é essencial para a competitividade deste produto. Esta área é relacionada tanto a decisões de localização de usinas, destilarias, terminais de transbordo e portuários, execução do transporte utilizando os diferentes modais, armazenagem, processamento de pedidos, dentre outros, participa de forma marcante na formação de preços do etanol.

No caso do etanol, o modal de transporte mais utilizado para o transporte de produto das unidades produtoras de etanol às bases de distribuição e entre as bases de distribuição é o modal rodoviário, devido a sua grande disponibilidade e maior confiabilidade no uso. Porém, no caso de algumas unidades produtoras que possuem terminais de transbordo rodoferroviário perto de sua estrutura, o modal ferroviário também é utilizado.

O principal objetivo do presente artigo é elaborar um modelo matemático de transporte do etanol brasileiro da região Centro-Sul do país com destino às bases de distribuição e portos brasileiros. Nesse sentido, serão avaliados os impactos econômicos e logísticos da inserção da hidrovía e dutovía para transporte de etanol, sob a ótica da agroindústria sucroenergética em diferentes cenários projetados para 2020.

2. LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN MANAGEMENT

A logística é definida como o processo de planejamento estratégico, implantação e controle operacional da movimentação de mercadorias, serviços e informações ao longo de todos os agentes envolvidos no fornecimento de matéria-prima, produção e distribuição ao consumidor final de determinado produto, buscando atender a suas demandas com o nível de serviço desejado e o menor custo possível (Daskin, 1985, Ballou, 2004, Bowersox et al, 2002).

Visando ampliar o conceito da logística tradicional, o conceito de cadeia de suprimentos (*supply chain* no inglês) foi desenvolvido por meio do estudo de movimentação de produtos

do produtor ao consumidor final. Enquanto a logística foca basicamente nas operações de uma empresa em particular, a gestão da cadeia de suprimentos visa otimizar o conjunto de etapas desde a compra de insumos pela unidade produtora até a entrega do produto final ao consumidor, englobando todas as empresas envolvidas nas diferentes etapas, que são chamadas de elos (Chopra e Meindl, 2010).

No caso de produtos agroindustriais, a logística impacta de forma significativa no preço final do produto, levando a decisões para a diminuição de seus custos como: localização das unidades de produção perto da matéria-prima; pulverização de unidades de produção de matérias-primas; e concentração de unidades de processamento (Caixeta Filho et al, 1998, Caixeta Filho e Gameiro, 2001, Caixeta Filho, 2010).

Dentre as ferramentas disponíveis para o aumento da eficiência dos sistemas logísticos e diminuição de seus custos, encontra-se a modelagem matemática (Caixeta Filho, 2010). A modelagem matemática pode ser utilizada para localização de unidades, planejamento do transporte e armazenamento, roteirização dos veículos na distribuição de produtos, dentre outros, sendo considerado de grande importância para a melhoria de cadeias de suprimentos (Ballou, 2004, Simon e Blume, 2004).

Daskin (1995) define os modelos de otimização de sistemas de transporte como uma modelagem para otimizar o fluxo de produtos entre instalações, definindo as melhores rotas a serem percorridas para transportar produtos de sua origem na unidade produtora aos pontos de demanda nos mercados. Estes podem considerar os custos e/ou tempos de viagem, diferentes tipos de veículos e modais alternativos, além de restrições em atendimento de demanda, oferta por unidades produtoras, dentro outros (Ballou, 2004, Daskin, 1995).

3. A CADEIA DO ETANOL PARA O MERCADO INTERNO

Milanez et al (2010) realizaram um estudo detalhado sobre a logística do etanol, e citam que o modal rodoviário é o mais utilizado nesta cadeia por dois motivos principais: baixo volume de carga em rotas curtas, principalmente no estado de SP, e grandes distâncias entre unidades produtoras de etanol e terminais de transbordo. Estes fatores, aliados a uma baixa escala de produção, aumentam a dificuldade no uso de modais alternativos.

A Figura 1 demonstra a cadeia de suprimentos de etanol, focando nos fluxos de produto.

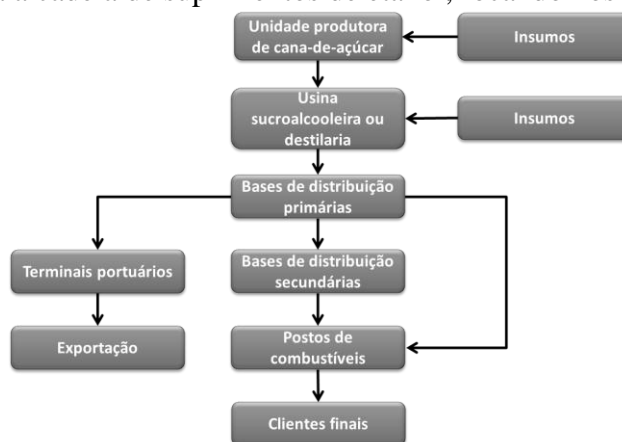


Figura 1. Cadeia de suprimentos do etanol considerando mercado interno e exportação.
Fonte: os autores, 2013.

Segundo Milanez et al (2010), das bases de distribuição primária o produto pode seguir por três rotas distintas: (i) o produto segue para os terminais portuários, sendo carregado em tanques de armazenamento para posteriormente serem bombeadas para os navios-tanque; (ii) o produto segue diretamente para os postos de combustíveis, via modal rodoviário; (iii) o produto é transferido para outra base de distribuição, denominada base de distribuição secundária, para então ser movimentado para os postos de combustíveis. O caso (ii) corresponde a 80% da movimentação do produto para o mercado interno (Milanez et al, 2010). O caso (iii) serve basicamente para a distribuição de combustível para locais mais remotos do país. Por fim, dos postos o produto é adquirido pelo consumidor final.

Atualmente o modal dutoviário é utilizado somente para poucas rotas de curtas distâncias, entre a refinaria de Paulínia (SP) e o Rio de Janeiro (RJ), entre a refinaria de Araucária (PR) e Paranaguá (PR) e entre as bases de Santa Catarina (SC). A movimentação utilizando este modal foi, em 2009, de 1,8% dos fluxos totais no país, demonstrando o fato de que, atualmente, a dutovia não possui um papel significativo como modal para o transporte de etanol. O transporte ferroviário, por sua vez, correspondeu a 7,1% do volume transportado naquele ano (Milanez et al, 2010).

Uma iniciativa visando fomentar o uso do modal hidroviário no transporte de etanol para mercado interno é a criação do Sistema Logístico Multimodal de Etanol (Logum, 2013, Estado de São Paulo, 2012), uma iniciativa por parte dos maiores agentes produtores de etanol do país (Copersucar e Raizen), empresas da área de engenharia, a Petrobras e a Uniduto. Neste projeto, que utilizará comboios de empurradores e barcaças para transporte de etanol na hidrovía Tietê-Paraná no estado de São Paulo, de Araçatuba (SP) e Presidente Epitácio (SP) até Anhembi (SP), de onde o produto será transportado utilizando dutos até a base de distribuição de Paulínia (SP). A expectativa é que até 2.020 movimente-se 12,7 e 9,1 milhões de m³ de etanol na dutovia e hidrovía, respectivamente.

A Figura 2 ilustra o Sistema Logístico Multimodal de Etanol, o qual viabilizará o transporte de etanol por dutovia e hidrovía na região Centro-Sul do país. O etanol será captado nos terminais e transportados por dutos desde Jataí (GO) até Paulínia (SP) e também pela hidrovía Tietê-Paraná no estado de São Paulo, de Araçatuba (SP) e Presidente Epitácio (SP) a Anhembi (SP). Deste, o produto será transportado via dutos à base de distribuição de Paulínia (SP), a qual comercializa e distribui o etanol nos polos consumidores do país (Logum, 2013).

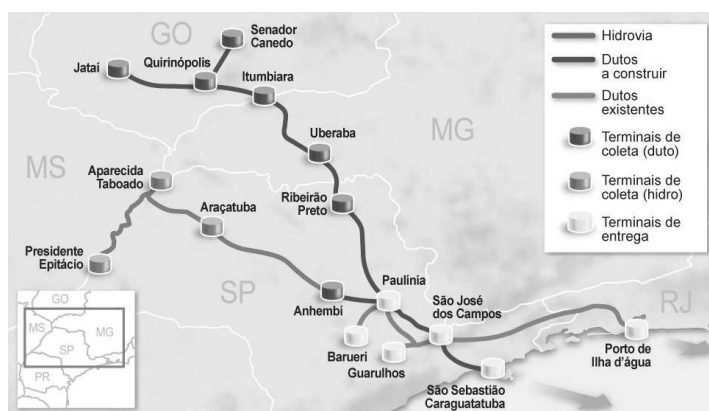


Figura 2. Conexão das bases de distribuição com a rede multimodal
Fonte: Logum, 2013

4. MODELOS DE TRANSPORTE APLICADOS A CADEIAS AGROINDUSTRIAIS

O uso de modelos de otimização nas cadeias de produtos agroindustriais, seja na localização de unidades ou no planejamento de sistemas de transporte, vem aumentando sua importância nos últimos anos. Devido ao aumento da importância do etanol, advindo de diversos fatores, dentre eles o desenvolvimento de carros *flex-fuel* e melhorias nos processos de produção e distribuição, um aumento na quantidade de trabalhos voltados a essa cadeia de suprimentos vem sendo observado. O uso de modelos matemáticos visa fornecer informações úteis ao tomador de decisões.

Branco et al (2010) propõe um modelo matemático utilizando o software *General Algebraic Modeling System* (GAMS) para otimizar o transporte de safras agrícolas originárias na região Centro-Oeste e destinadas aos estados de SP e PR, considerando diferentes produtos: açúcar, álcool, milho, trigo e os produtos do complexo soja. Os autores simularam dois cenários, considerando as interações entre os modais rodoviário e ferroviário: a otimização da situação atual, e a otimização do sistema de transportes considerando o crescimento e consumo destes produtos em 2015.

Dal-Mas et al (2011) elaboraram um modelo dinâmico estocástico com múltiplos elos utilizando programação linear inteira mista para auxiliar os tomadores de decisão e possíveis investidores na cadeia de suprimentos. A principal contribuição deste trabalho é considerar o planejamento anual para um horizonte de dez anos, levando em conta a incerteza do preço de compra da matéria-prima e do preço de venda do etanol.

Akgul et al (2012) elaboraram um modelo de programação linear inteira mista para otimizar a cadeia de suprimentos de etanol no Reino Unido, considerando o aumento esperado no uso deste biocombustível em 2020 a partir de diferentes matérias-primas. Os autores concluíram que a produção de etanol de segunda geração permitiria uma menor dependência da importação de biomassa pelo país. O modelo demonstra que, com a diminuição no custo do uso desta tecnologia, ela deve aumentar sua importância no país.

Osleeb e Ratick (2010) desenvolveram um modelo matemático para otimizar o sistema de transporte de etanol nos Estados Unidos das unidades produtoras às refinarias, utilizando o modal ferroviário. Um estudo de caso foi realizado com a ferrovia *Burlington Northern Santa Fe Railway* (BNSF), uma linha férrea que atende regiões tanto de refinarias quanto de indústrias produtoras de etanol. Os autores observaram uma diminuição de cerca de 25% nos custos de transporte no cenário com possibilidade de uso de terminais concentradores de carga, trens de alta capacidade e armazéns.

Um modelo de programação integral estocástica desenvolvido por Chen e Fan (2012) para complementar o modelo de Huang et al (2010), considera cenários nos quais tanto a demanda de produtos agrícolas para produção do etanol quanto a oferta do mesmo possuem incertezas. Esta contribuição é de grande importância no caso de mercados com alta variabilidade na demanda de etanol ou mercados com volumes variáveis de matéria-prima ao longo do tempo, como é o caso de grande parte dos resíduos agrícolas.

Sarmiento et al (2012) apresentam um modelo de modelagem matemática para a localização de novas indústrias produtoras de etanol a partir de milho, observando que os principais fatores que influenciam esta decisão são: características agrícolas do local; outras unidades produtoras nos arredores; subsídios oferecidos nas diferentes regiões. Os resultados

observados podem ser utilizados para planejamento tanto para investidores na escolha de locais para a construção de novas indústrias produtoras de etanol, quanto pelo governo para criar novos incentivos para atração de investidores.

5. METODOLOGIA

5.1. Especificação dos dados

O modelo proposto visa estudar os impactos econômicos da inclusão das hidrovias e dutovias para o transporte de etanol anidro e hidratado entre as agroindústrias produtoras às bases de distribuição e portos. Nesse sentido, não serão avaliados os fluxos de distribuição de etanol entre as bases para o mercado consumidor final, uma vez que o modelo visa minimizar custos logísticos do canal de comercialização de etanol da agroindústria.

Primeiramente, foi feito um levantamento da oferta de cada município de etanol anidro e hidratado utilizando-se os dados de ÚNICA (2012) e Anuário da Cana (2012), referentes a safra 11/12. A projeção de oferta de produtos para 2020 foi estimada com base em informações da Empresa de Planejamento Energético (EPE, 2012).

O próximo passo foi o levantamento da demanda dos produtos. A demanda para mercado externo foi considerada com base nas exportações do ano de 2012 (MDIC/Secex, 2013), e a demanda para o mercado interno foi considerada relativamente à demanda de bases de distribuição no país (ANP, 2011).

As capacidades dos terminais ferroviários foram estimadas com base nos dados públicos da ANTT (ANTT, 2012) sobre movimentação ferroviária de etanol. Para a elaboração dos cenários, foram utilizadas capacidades estimadas com base na taxa geométrica de crescimento de movimentação ferroviária dos últimos cinco anos (ANTT, 2012). As capacidades dos terminais dutoviários e hidrovários foram fornecidas por Logum (Logum, 2013).

Os custos de transporte ferroviário foram estimados com base em ANTT (ANTT, 2011), aplicando-se uma taxa de desconto de 10%, visto que tais tarifas são as máximas praticadas, por isso a aplicação da taxa de desconto para viabilizar a competitividade do transporte ferroviário (ESALQ-LOG, 2012). Os custos de transporte hidroviário e dutoviários foram disponibilizados por Logum (Logum, 2013). Os custos de transporte rodoviário foram estimados por um modelo de regressão linear simples, utilizando a base de dados de preços de fretes de etanol efetivos no mercado no ano de 2012 (ESALQ-LOG, 2012).

Os custos de transporte da movimentação futura mantiveram-se a valores correntes, com o objetivo de manter a atual paridade de custos reais entre os modais, visto que o custo de transporte rodoviário é um fator de competitividade para captação de cargas na ferrovia, hidrovieira e dutovia.

5.2. Formulação matemática do modelo e definição dos cenários

As variáveis de decisão deste modelo são relacionadas à quantidade a ser transportada de etanol anidro e hidratado entre os municípios produtores e as bases de distribuição de etanol, utilizando uma rede de transporte multimodal. O modelo formulado visa estudar os impactos econômicos da inclusão das hidrovias e dutovias para o transporte de etanol anidro e hidratado entre as agroindústrias produtoras às bases de distribuição e portos, para projeções de 2020. A Equação 1 ilustra o objetivo do modelo proposto, com a função de minimizar o

custo de transporte (CT) das agroindústrias de etanol anidro e hidratado.

$$\text{Minimizar CT} = \sum_i \sum_j \sum_p \text{crd}_{ij} \cdot \text{FR}_{ij}^p + \sum_i \sum_t \sum_p \text{cprf}_{it} \cdot \text{FPRF}_{it}^p + \sum_i \sum_h \sum_p \text{cprh}_{ih} \cdot \text{FPRH}_{ih}^p + \sum_i \sum_d \sum_p \text{cprd}_{id} \cdot \text{FPRD}_{id}^p + \sum_t \sum_j \sum_p \text{cf}_{tj} \cdot \text{FF}_{tj}^p + \sum_d \sum_j \sum_p \text{cd}_{dj} \cdot \text{FD}_{dj}^p + \sum_h \sum_j \sum_p \text{ch}_{hj} \cdot \text{FH}_{hj}^p \quad (1)$$

onde:

Os conjuntos são:

i refere-se aos municípios produtores de etanol no Centro-sul brasileiro (115 elementos);

j refere-se aos municípios com base de distribuição de etanol e portos (111 elementos);

p refere-se aos produtos transportados - etanol anidro e hidratado (2 elementos);

t refere-se aos terminais ferroviários de embarque (13 elementos);

d refere-se aos terminais dutoviários de embarque (5 elementos);

h refere-se aos terminais hidroviários de embarque (3 elementos);

As variáveis do modelo são:

FR_{ij}^p = fluxo rodoviário do etanol *p* do município produtor *i* ao destino *j*;

FPRF_{it}^p = fluxo da ponta rodo-ferroviário do etanol *p* do município produtor *i* ao terminal ferroviário *t*;

FPRH_{ih}^p = fluxo da ponta rodo-hidroviária do etanol *p* do município produtor *i* ao terminal hidroviário *h*;

FPRD_{id}^p = fluxo da ponta rodo-dutoviária do etanol *p* do município produtor *i* ao terminal hidroviário *d*;

FF_{tj}^p = fluxo ferroviário do etanol *p* do terminal de embarque ferroviário *t* ao destino final *j*;

FH_{hj}^p = fluxo hidroviário do etanol *p* do terminal hidroviário de embarque *h* ao destino final *j*;

FD_{dj}^p = fluxo dutoviário do etanol *p* do terminal dutoviário de embarque *d* ao destino final *j*.

Os parâmetros do modelo são:

crd_{ij} é o custo rodoviário direto do município produtor *i* ao destino *j*;

cprf_{it} é o custo rodoviário da ponta rodo-ferroviário do município *i* ao terminal *t*;

cprh_{ih} é o custo rodoviário da ponta rodo-hidroviária do município *i* ao terminal *h*;

cprd_{id} é o custo rodoviário da ponta rodo-dutoviária do município *i* ao terminal *d*;

cf_{tj} é o custo ferroviário do terminal *t* ao destino *j*;

ch_{hj} é o custo hidroviário do terminal *h* ao destino *j*;

cd_{dj} é o custo dutoviário do terminal *d* ao destino *j*;

PRODUCAO_i^p é a produção do etanol *p* no município produtor *i*;

DEMANDA_j^p é a demanda do etanol *p* no município demandante (base de distribuição e porto) *j*;

CAPACIDADE_t é a capacidade de embarque de cada terminal ferroviário *t*;

CAPACIDADE_h é a capacidade de embarque de cada terminal hidroviário *h*;

CAPACIDADE_d é a capacidade de embarque de cada terminal dutoviário *d*;

A função objetivo é sujeita aos seguintes conjuntos de restrições:

- a. Restrição de oferta de etanol p em cada município produtor i:

$$\sum_j FR_{ij}^p + \sum_t FPRF_{it}^p + \sum_h FPRH_{ih}^p + \sum_d FPRD_{id}^p \leq \text{PRODUCAO}_i^p, \forall i, p \quad (2)$$

- b. Restrição de demanda de etanol p em cada município j (bases de distribuição ou porto):

$$\sum_i FR_{ij}^p + \sum_t FF_{tj}^p + \sum_h FH_{hj}^p + \sum_d FD_{dj}^p \geq \text{DEMANDA}_j^p, \forall j, p \quad (3)$$

- c. Restrições de capacidade dos terminais multimodais ferroviários, hidroviários e dutoviários, respectivamente. Tais terminais atende tanto etanol anidro, quanto hidratado, sendo que as proporções destes produtos no embarque em cada terminal multimodal são definidas pela alocação mais econômica do modelo de minimização.

$$\sum_i \sum_p FPRF_{it}^p \leq \text{CAPACIDADE}_t, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_i \sum_p FPRH_{ih}^p \leq \text{CAPACIDADE}_h, \forall h \quad (5)$$

$$\sum_i \sum_p FPRD_{id}^p \leq \text{CAPACIDADE}_d, \forall d \quad (6)$$

- d. Restrições de equilíbrio das redes rodoviárias, ferroviárias, hidroviárias e dutoviárias, de tal forma que tais restrições garantam continuidade dos fluxos (balanceamento da rede multimodal).

$$\sum_i FPRF_{it}^p = \sum_j FF_{tj}^p, \forall p, t \quad (7)$$

$$\sum_i FPRH_{ih}^p = \sum_j FH_{hj}^p, \forall p, h \quad (8)$$

$$\sum_i FPRD_{id}^p = \sum_j FD_{dj}^p, \forall p, d \quad (9)$$

- e. Restrição de limitação do uso multimodal (contratação multimodal) para cada município produtor i no transporte do etanol p. Tal restrição evita fluxos do tipo “tudo-ou-nada”, garantindo uma maior aderência à realidade do transporte de etanol, tendo em vista um conjunto de fatores que dificultam contratos de escoamento de toda produção do produto via modais alternativos. Tais como: dificuldades de exclusividade em contratos com concessionárias ferroviárias, concorrência entre municípios produtores vizinhos para utilizar a mesma infraestrutura, necessidade de operadores de transporte multimodal, dentre outros. Neste estudo, adotou-se uma taxa de 75% ($\alpha=0,75$) do uso multimodal nos quatros principais cenários e uma taxa de 100% no último cenário.

$$\sum_t FPRF_{it}^p + \sum_h FPRH_{ih}^p + \sum_d FPRD_{id}^p \leq \alpha \cdot \text{PRODUCAO}_i^p, \forall i, p \cap \alpha \in (0,1) \quad (10)$$

- f. Positividade das variáveis:

$$FR_{ij}^p, FPRF_{it}^p, FPRH_{ih}^p, FPRD_{id}^p, FF_{tj}^p, FH_{hj}^p, FD_{dj}^p \geq 0 \quad (11)$$

Para o caso de combinação entre os terminais ferroviários, hidroviários e dutoviários e os destinos que não possuem conexão, foram consideradas somente as combinações factíveis.

O modelo foi elaborado e processado no software General Algebraic Modeling System (GAMS), utilizando o solver CPLEX. O processamento do mesmo levou 129 segundos.

A Tabela 1 a seguir contém os cenários a serem estudados e seus parâmetros alterados. O cenário atual ilustra a atual configuração de transporte atual de etanol. O cenário Base é

relativo a projeção de oferta e demanda de etanol anidro e hidratado para o ano de 2020, sem o uso da hidrovía e dutovia – de tal forma que tal cenário seja um balizador dos ganhos econômicos dessas novas infraestruturas. Os cenários C1 e C2 correspondem à inclusão dos terminais de embarque hidroviários e dutoviário, com taxas de capacidade de 50% e 100% da capacidade nominal publicada pela Logum, respectivamente. No cenário C3, a alteração do parâmetro em relação ao cenário C2, é o aumento da taxa do limite superior de uso da multimodalidade para cada município produtor de 75% para até 100%.

Tabela 1. Especificação dos parâmetros dos cenários elaborados

Cenários	Ano	Oferta ¹ /Demanda (milhões m ³)	Capacidade (milhões m ³)			Alteração dos parâmetros em relação ao cenário anterior
			Hidro	Duto	Ferro	
Atual	2012	21,8	-	-	0,7	-
Base	2020	45,7	-	-	1,4	Aumento da capacidade da capacidade da malha ferroviária
C1	2020	45,7	6,4	4,6	1,4	Inclusão de hidrovía e dutovia com capacidade de 50% da capacidade nominal ²
C2	2020	45,7	12,7	9,1	1,4	Inclusão de hidrovía e dutovia com capacidade de 100% da capacidade nominal ²
C3	2020	45,7	12,7	9,1	1,4	Aumento da taxa limite de uso multimodal dos municípios produtores de 75% para até 100%

¹Produção: 58,1% corresponde a produção de hidratado, o restante representa a produção de anidro (Única/Anuário da Cana, 2012).

²Capacidade nominal projetada para o ano de 2.020, publicada pela Logum (2013).

6. RESULTADOS

Os resultados apontam que o uso de um sistema multimodal no transporte de etanol na região Centro-Sul pode gerar uma economia no custo médio do frete (R\$/m³) entre 8,7% e 16,6% para o etanol anidro e entre 19,8% e 30,3% para o etanol hidratado, se comparados cenário Base. Tais resultados podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2. Custo médio do frete (R\$/m³) de etanol anidro e hidratado nos cenários analisados

Cenários	Etanol anidro		Etanol hidratado	
	Custo médio do frete	Varição ²	Custo médio do frete	Varição
Atual	71,20	-	68,43	-
Base	71,71	-	68,45	-
C1	65,51	-8,7%	54,82	-19,9%
C2	59,79	-16,6%	50,24	-26,6%
C3	61,43	-14,3%	47,73	-30,3%

¹Varição de custo em relação ao cenário “Base”

Nesse contexto, pelos resultados da Tabela 2, caso exista a possibilidade e viabilidade de realizar contratos multimodais para transportar toda produção de cada município produtor de etanol, ocorre uma redução no custo de transporte de hidratado na ordem de 5% se comparado à limitação imposta de 75% do uso da multimodalidade, em detrimento do anidro, o qual o custo aumenta na ordem de 2,7%. Isso ocorre devido ao fato do modelo alocar de forma mais econômica o etanol hidratado na hidrovía e dutovia do que anidro, visto que a produção de hidratado corresponde a 58,1% da produção de etanol.

A Tabela 3 ilustra a participação do etanol anidro e hidratado no uso dos modais dutoviário e hidroviário nos diferentes cenários, em relação ao total transportado utilizando o modal em questão. É possível observar que o modal hidratado utilizou em maior quantidade os modais dutoviário e hidroviário em todos os cenários, devido principalmente ao seu maior volume de produção nas regiões estudadas, em relação ao etanol anidro.

Tabela 3. Distribuição do volume transportado nos modais dutoviário e hidroviário por tipo de etanol, nos diferentes cenários estudados

Cenários	Dutoviário		Hidroviário	
	Anidro	Hidratado	Anidro	Hidratado
C1	26,2%	73,8%	12,5%	87,5%
C2	30,5%	69,5%	25,3%	74,7%
C3	22,5%	77,5%	21,3%	78,7%

A Figura 4 ilustra a evolução da matriz de transporte da cadeia nos diferentes cenários propostos. Nesse sentido, verifica-se a modificação do transporte rodoviário de 97% do volume transportado no cenário Base para 85% , 78% e 77%, para os cenários C1, C2 e C3, respectivamente.

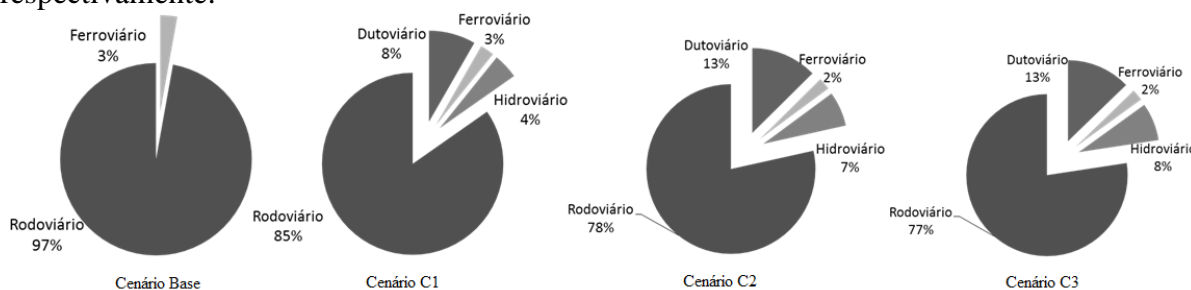


Figura 4. Matriz de transporte de etanol (em %) nos diferentes cenários

Com relação ao custo médio de frete das principais mesorregiões produtoras de etanol do Centro-Sul brasileiro, observou-se que as regiões mais impactadas pelas novas infraestruturas de transporte multimodal em 2020 foram: Ribeirão Preto, Araçatuba, Triângulo Mineiro, Sul Goiano e Presidente Prudente. Estas regiões apresentaram reduções de custos na faixa de 32% a 45%, quando comparados ao cenário base. Tais fatores podem ser explicados em função de que essas regiões estão próximas aos terminais dutoviário e hidroviários, ou seja, fazem parte da área de influência destas novas infraestruturas.

As principais limitações do trabalho dizem respeito às escolhas realizadas para simplificar o modelo: não considerar os custos de armazenagem e processamento de pedidos; não considerar investimento inicial no desenvolvimento da infraestrutura necessária para o uso dos modais alternativos propostos; e não considerar a competição com outros produtos no uso da hidrovía. Trabalhos futuros dizem respeito a ampliar o modelo considerando os fatores citados anteriormente, e considerar produtos concorrentes no uso dos modais alternativos estudados, como outros combustíveis.

7. CONCLUSÃO

Por meio do uso da modelagem matemática utilizando o GAMS, o presente artigo objetivou avaliar os impactos logísticos e econômicos com a inserção da hidrovía e dutovía no transporte de etanol anidro e hidratado, sob a ótica da agroindústria sucroenergética.

Nesse sentido, foram avaliados cenários com diversos limites de capacidade de transporte dutoviário e hidrovieário. No cenário mais otimista, a matriz de transporte de etanol reduziu a participação do modal rodoviário de 97% para 77%, o que resultou em menores custos de transporte de etanol, sendo que as maiores reduções foram visualizadas na ordem de 14,3% e 30,3% para anidro e hidratado, respectivamente. Desta forma, ficou evidente que o etanol hidratado possui uma vantagem relativa muito maior com o uso da hidrovia e dutovia do o anidro.

Além disso, verificou-se que estratégias que possam garantir maiores taxas do uso da multimodalidade para cada agroindústria produtora de etanol implicam em uma maior redução no custo de transporte de etanol hidratado, o qual possui maior produção no Centro-Sul brasileiro.

O grande fator de competitividade no transporte multimodal é a paridade de custos entre rodovia, ferrovia, hidrovia e dutovia. Nesse sentido, para os custos correntes, o novo sistema de transporte apresentou uma paridade de custos maior para rotas longas e menores para rotas curtas, gerando uma vantagem comparativa para as agroindústrias que estejam próximas ao sistema dutoviário e hidrovieário, sendo que em tais regiões as reduções do custo de transporte podem chegar a até 50%. Desta forma, a hidrovia e a dutovia apresentaram grande vantagem econômica para redução dos custos de transporte de etanol anidro e hidratado no Centro-Sul brasileiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akgul, O.; N. Shah e L. G. Papageorgiou (2012) Economic optimisation of a UK advanced biofuel supply chain. *Biomass and Bioenergy*, v. 41, p. 57-72.
- ANP (2013) *Anuário ANP 2012*. Agência Nacional do Petróleo, Biocombustíveis e Gás Natural. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Consulta realizada em 10 de junho de 2013.
- ANTT (2012) Estatísticas Ferroviárias. Agência Nacional de Transporte Terrestres. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br>>. Consulta realizada em 23 de junho de 2013.
- ANUÁRIO DA CANA - Procana. *Anuário da Cana 2012*. Ribeirão Preto, 2012.
- Ballou, R. H. (2004) *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial* (5ed.). Bookman, São Paulo, SP.
- Bowersox, D. J.; D. J. Closs e D. J. Cooper (2002) *Supply Chain Logistics Management*. McGraw-Hill Publisher, New York, USA,.
- Branco, J. E. H. e J. V. Caixeta Filho (2008) Estimating Freight Demand for North-South Railway: a Brazilian Case Study. *10th International Conference on Application of Advanced Technologies in Transportation*, p. 1-14.
- Branco, J. E. H.; J. V. Caixeta Filho; C. E. O. Xavier; R. L. Lopes e A. H. Gameiro (2010) Desenvolvimento de modelo matemático de otimização logística para o transporte multimodal de safras agrícolas pelo corredor Centro-Oeste. *Informe Gepec*, Toledo, v. 14, n. 1, p. 84-100.
- Caixeta Filho, J. V. (2010) Logística para a agricultura brasileira. *RBCE*, v. 25, n. 103, p. 18-30.
- Caixeta Filho, J. V. e A. H. Gameiro (2001) *Transporte e Logística em Sistemas Agroindustriais*. Atlas, São Paulo, SP.
- Caixeta Filho, J. V.; N. D. V. Silva; A. H. Gameiro; R. L. Lopes; P. R. C. Galvani; L. M. Martignon e R. W. C. Marques (1998) *Competitividade no Agribusiness: A Questão do Transporte em um Contexto Logístico*. Piracicaba, SP.
- CENTRAN - Centro de Excelência em Engenharia de Transportes (2007) *PNLT - Plano Nacional de Logística e Transportes*. Brasília, DF.
- Chen, C. e Y. Fan (2012) Bioethanol supply chain system planning under supply and demand uncertainties. *Transportation Research Part E*, v. 48, p. 150-164
- Chopra, S. e P. Meindl (2010) *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation* (4ed.). Pearson Education, New Jersey, USA.
- Dal-Mas, M.; S. Giarola; A. Zamboni e F. Bezzo (2011) Strategic design and investment capacity planning of

- the ethanol supply chain under price uncertainty. *Biomass and Bioenergy*, v. 35, p. 2059-2071.
- Daskin, M. S. (1985) Logistics: an overview of the state of the art and perspectives on future research. *Transportation Research - A*, v.19A, n.5/6, p.383-393.
- Daskin, M. S. (1995). *Network and Discrete Location*. John Wiley and Sons, New York, USA.
- EPE (2013). *Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*. Empresa de Planejamento Energético. Brasília – DF. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Petroleo/Paginas/default.aspx>>.
- ESALQ-LOG (2012). Sistema de Informações de Fretes. Piracicaba – SP. Disponível em: <<http://sifreca.esalq.usp.br/sifreca/pt/index.php>>. Acessado em 09 de junho de 2013.
- Estado de São Paulo (2012) Etanol deverá dobrar movimento na hidrovia Tietê-Paraná até 2016. Caderno Economia, 06 de Dezembro de 2012. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,etanol-devera-dobrar-movimento--na-hidrovia-tiete-parana-ate-2016-,969940,0.htm>> . Acesso em: 10 de Junho de 2013.
- Huang, Y.; C. Chen, e Y. Fan (2010) Multistage optimization of the supply chains of biofuels. *Transportation Research Part E*, v. 46, p. 820-830
- Junginger, M.; T. Bolkesjø; D. Bradley; P. Dolzan; J. Heinimo; B. Hektor; O. Leistad; K. Ling; M. Perry; F. Rosillo-Calle; Y. Ryckmans; P. Schouwenberg; A. Faaij; E. Piacente; B. Solberg; E. Trømborg; A. S. Walter, A. S. e M. Wit (2008) Developments in international bioenergy trade. *Biomass and Bioenergy*, v. 32, p. 717-729.
- Logum (2013) Logum Logística: O sistema Logum. Disponível em: <<http://www.logum.com.br/php/o-sistema-logum.php>> . Acesso em: 10 de Julho de 2013.
- MDIC/SECEX (2013) *Sistema AliceWeb*. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Brasília, DF.
- Milanez, A. Y.; D. Nyko; J. L. F. Garcia e C. E. O. XAVIER (2010) Logística para o etanol: situação atual e desafios futuros. *BNDES Setorial*, n. 31, p. 49-98.
- Novaes, A. G. N. (1986) *Sistemas de Transporte: Terceiro volume*, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, SP.
- Osleeb, J. P. e S. J. Ratick (2010) An interperiod network storage location-allocation (INSLA) model for rail distribution of ethanol biofuels. *Journal of Transport Geography*, v. 18, p. 729-737
- Sarmiento, C.; W. Wilson e B. Dahl (2012) Spatial competition and ethanol plant location decisions. *Agribusiness*, v. 28, n. 03, p. 260-273
- Simon, C. P. e L. Blume (2004) *Matemática para economistas*. Bookman. Porto Alegre, RS.
- ÚNICA (2013) *Estatísticas de dados*. São Paulo, SP. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 10 de junho de 2013.