

RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ESCOAMENTO DA SOJA NO BRASIL POR HUB-AND-SPOKE

Ana Paula Milanez

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, CEP 13083-852, Campinas, SP, Brasil
pmilanez@densis.fee.unicamp.br

Anibal Tavares de Azevedo

Faculdade de Ciências Aplicadas
Universidade Estadual de Campinas
R. Pedro Zaccaria, 1300, CEP 13484-350, Limeira, SP, Brasil
anibal.azevedo@fca.unicamp.br

Andréa Leda Ramos de Oliveira

Faculdade de Ciências Aplicadas
Universidade Estadual de Campinas
R. Pedro Zaccaria, 1300, CEP 13484-350, Limeira, SP, Brasil
andrea.oliveira@fca.unicamp.br

Takaaki Ohishi

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
Av. Albert Einstein, 400, CEP 13083-852, Campinas, SP, Brasil
taka@densis.fee.unicamp.br

Resumo

O problema de localização de hub tem ampla aplicação no setor de transporte, especialmente no transporte de mercadorias entre muitas origens e destinos. Hubs são facilidades especiais usados para consolidar e redirecionar o fluxo, o que permite uma redução do número de links na rede e diminuir o custo de transporte. Em particular, o caso do escoamento da soja no Brasil pode ser visto como um problema de localização de hubs. Deste modo, os autores propõem um modelo de localização de hubs para tratar o problema de exportação da soja das microrregiões do Mato Grosso para os portos.

Palavras-Chaves: Hub; Problema de hub capacitado com múltipla alocação; soja.

Abstract

Hub location problem has a wide application in transportation to serve demand for goods between many origins and many destinations. Hubs are special facilities used to switch and consolidate origin-destination flows allowing the reduction of links number and transportation cost. The particular case of soybeans chain in Brazil can be seen as a hub location problem. This way, we propose a hub location model to treat the soybeans exportation problem from Mato Grosso to maritime ports.

Keywords: Hub; Capacitated multiple assignment hub location problem; soybeans;

INTRODUÇÃO

A expansão do agronegócio tem sido marcante na sociedade brasileira, caracterizando-se por cadeias produtivas cada vez mais integradas e pelo uso intensivo de capital nos diversos segmentos que o compõe. Considerando alguns aspectos da agricultura, tais como: a elevada participação no PIB, manutenção do saldo positivo da balança comercial e a contribuição para o controle da inflação, evidencia-se sua importância para o desempenho da economia brasileira (OLIVEIRA, 2011).

A cadeia produtiva da soja é um dos segmentos que colaboram para posição de destaque do agronegócio brasileiro. Segundo o *United States Department of Agriculture* (USDA, 2013), o Brasil é o maior produtor e exportador do grão, superando os Estados Unidos na safra 2012/13, o que evidencia o papel de destaque na soja na economia brasileira, seja em termos de geração de divisas, seja para a manutenção da balança comercial superavitária.

Entre os estados brasileiros, o Estado do Mato Grosso é o principal produtor de soja, mas, em contraste a sua grande produção, o estado por esta localizado no Centro-Oeste brasileiro, demanda de um longo processo logístico para escoar a soja até os portos. Além disso, o grão segue para os portos brasileiros basicamente através do modal rodoviário, sendo este o modal que apresenta um maior custo e menor eficiência (em termos de capacidade movimentada) para o transporte de carga desse gênero (PINHEIRO E CAIXETA-FILHO, 2010).

Analisando a condição da logística brasileira e a necessidade de elevar a competitividade da soja brasileira, alguns trabalhos se dedicam a desenvolver estudos para determinar a rota da soja do produtor até os portos e, conseqüentemente, diminuir os custos logísticos.

Ferrari (2006) busca organizar o arranjo espacial das unidades armazenadoras de soja no estado do Mato Grosso e o dimensionamento destes armazéns com o objetivo de minimizar os custos de transporte, de armazenamento e de distribuição até os principais portos. Oliveira (2007) apresenta uma formulação linear e estima os fluxos nas principais alternativas de rotas de exportação da soja no estado do Mato Grosso que implicam em menor custo de escoamento. Pinheiro e Caixeta-Filho (2010) propõem um modelo linear para avaliar o custo de transporte rodoviário de levar a soja das microrregiões mato-grossense para o porto de Paranaguá e de Itaquí como alternativa para o despacho de carga pelo Porto de Santos. Dubke e Pizzolato (2011) tratam o problema de escoamento de soja desenvolvendo um modelo de localização capacitado para terminais especializados usando o modelo tradicional de transporte combinado com multi-commodity e fluxo de redes para multi-facilidades. Amaral, Almeida e Morabito (2009) ressaltam a importância de rotas intermodais nos casos de produtos agrícolas destinados a exportação. Assim, os autores propõem um modelo de localização de facilidades p-mediana para localização de terminais intermodais utilizando os principais corredores usados para exportação da soja. Peixoto e Pinto (2012) apresentam três modelos de rede de fluxo da soja entre as áreas produtoras e as processadoras. O primeiro modelo considera que o grão é transportado entre os pontos de origem e destino, no segundo modelo é possível o transporte direto e a passagem do grão por pelo menos dois pontos de transbordo e no terceiro por pelo menos um ponto de transbordo.

Neste contexto, este trabalho propõe a concepção da rede pela localização de hubs, que através da consolidação de carga obtém vantagens de economia de escala reduzindo o custo de transporte e aumenta a eficiência da rede.

Inicialmente problema de localização de hubs destacou-se no uso de redes de hubs em sistemas de transporte e telecomunicações que atendem a demanda por produtos ou informação entre diversas origens e diversos destinos. O problema de localização de hubs aborda simultaneamente a localização de hubs e designação de nós de demanda a hubs, a fim

de rotear o tráfego entre o par origem-destino. Existem dois tipos de redes de hubs, chamadas de alocação única e alocação múltipla, que diferem na forma de alocação de nós de demanda a hubs. Na rede de hubs com alocação única todo tráfego de entrada e saída de um nó de demanda é roteado por um único hub, enquanto na rede de hubs com alocação múltipla, o tráfego de entrada e saída de um nó de demanda pode ser roteado por um ou mais hubs. Além disso, hubs podem ter uma capacidade finita ou infinita de fluxo.

Segundo Campbell (1994) o problema de localização discreta de hubs é classificado de acordo com a função objetivo: p -hub mediana, em que se minimiza o custo total de transporte, hub com custo fixo, que minimiza o custo total de transporte mais o custo fixo de abrir os hubs, p -hub centro, que minimiza o máximo tempo ou custo de transporte e o problema de cobertura por hubs, que minimiza o número de hubs abertos de forma que o tempo ou custo de transporte de fluxo entre qualquer origem e qualquer destino situa-se dentro de um limite.

Apesar do problema de localização de hub ter sido desenvolvido para solucionar o problema de transporte aéreo de passageiros e cargas recentemente, várias extensões do problema têm sido desenvolvidas. Destaca-se, para este trabalho, a investigação de casos de redes de hubs aplicados a transporte marítimo e ferroviário, respectivamente, pelos autores Aversa *et al.* (2005) e Jeong *et al.* (2007). Aykin (1994) apresenta um modelo capacitado de rede de hubs onde o transporte direto entre nós não-hubs é permitido. Alumur e Kara (2008) apresentam uma revisão de modelos de localização de hubs e mais extensões.

Neste trabalho é proposto o modelo capacitado de localização de hub com custo fixo e alocação múltipla (CMAHLP) para tratar do problema de escoamento da soja do estado do Mato Grosso (MT) até o porto, de onde a soja é exportada. O foco principal é determinar as localizações estratégicas para o escoamento, instalando hubs para consolidação e/ou mudança de modal, com o propósito de diminuir os custos e tornar a rede mais eficiente. Para aproximar o modelo matemático do cenário real de exportação, este artigo propõe 3 extensões do modelo CMAHLP: o modelo CMAHLP-D, que permite ligações diretas entre as origens-destinos, CMAHLP-R, que dados a carga disponível da soja e quantidade requerida, o modelo roteia a carga de modo a atender a demanda e CMAHLP-RD, que permite a ligação direta entre origens-destinos do modelo CMAHLP-R. Outra medida adotada, para aproximar o modelo da realidade, foi considerar que o investimento destinado a abertura de hubs é analisado de dois modos, quando o investimento é pago integralmente no início da operação e quando este investimento é financiado e o valor pago por operação é a parcela deste investimento.

A seguir é apresentada uma descrição do problema, que apresenta os dados utilizados para a análise e os modelos propostos, os resultados computacionais, que apresenta a análise obtida de por cada modelo sugerido e a conclusão, onde uma análise geral é realizada.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O Estado do Mato Grosso está situado no Centro-Oeste do Brasil e se destaca por sua área territorial, 903.366,192 Km² que corresponde a 10,61% da área total do país, e pelo desenvolvimento e participação do estado no agronegócio. As grandes dimensões do estado e a complexidade econômica tornam necessária a divisão do mesmo para facilitar os levantamentos de dados e dimensionar a sua economia agropecuária (IMEA, 2013).

A divisão territorial adotada por este trabalho é a divisão realizada pelo IBGE, que considera 22 microrregiões. Em função desta subdivisão, foi estimado um quadro de Balanço de Oferta e Demanda para as microrregiões para a safra 2012, isto porque as estatísticas oficiais não dispõem destas informações para o nível desagregado de microrregião. O objetivo destas estimativas foi dimensionar o volume disponível para exportação das diferentes microrregiões, Tabela 1. Em função da participação relativa de cada microrregião na

produção¹, a estimativa de exportação por microrregião seguiu o mesmo comportamento da participação relativa na produção. Ou seja, a microrregião de Alto Teles Pires teve uma participação relativa na produção de 35%, considerando-se as exportações de soja do Estado do Mato Grosso em 2012 que totalizaram 10.763,29 mil toneladas², a exportação estimada de Alto Teles Pires foi de 3.767,56 mil toneladas, o que corresponde também a uma participação de 35% nas exportações.

Tabela 01. Balanço de Oferta e Demanda de soja em MT, 2012 (mil toneladas).

Microrregião	Produção (mil ton) A	EstoqueInicial (mil t) B	Sementes (mil t) C	Processamento (mil t) D	Disponível (mil t) E=(A+B)-(C+D)	Exportação (mil t)
MI 01-Alta Floresta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI 02-Alto Guaporé	68,71	2,38	2,06	0,00	69,03	33,65
MI 03-Alto Araguaia	467,70	16,21	14,03	716,64	-246,76	0,00
MI 04-Alto Pantanal	14,21	0,49	0,43	0,00	14,27	6,96
MI 05-Alto Paraguai	162,64	5,64	4,88	0,00	163,40	79,65
MI 06-Alto Teles Pires	7.693,24	266,58	230,80	1.743,82	5.985,21	3.767,56
MI 07-Arinos	1.464,39	50,74	43,93	0,00	1.471,20	717,14
MI 08-Aripuanã	562,23	19,48	16,87	0,00	564,85	275,34
MI 09-Canarana	2.459,17	85,21	73,78	0,00	2.470,61	1.204,31
MI 10-Colíder	98,85	3,43	2,97	0,00	99,31	48,41
MI 11-Cuiabá	120,25	4,17	3,61	1.122,74	-1.001,93	0,00
MI 12-Jauru	7,53	0,26	0,23	0,00	7,57	3,69
MI 13-Médio Araguaia	51,38	1,78	1,54	0,00	51,62	25,16
MI 14-Norte Araguaia	555,12	19,24	16,65	47,78	509,92	271,85
MI 15-Paranatinga	614,36	21,29	18,43	0,00	617,22	300,87
MI 16-Parecis	4.067,13	140,93	122,01	0,00	4.086,05	1.991,77
MI 17-Primavera do Leste	1.521,08	52,71	45,63	716,64	811,52	744,91
MI 18-Rondonópolis	1.444,72	50,06	43,34	2.747,12	-1.295,68	0,00
MI 19-Rosário Oeste	16,67	0,58	0,50	0,00	16,75	8,16
MI 20-Sinop	1.607,51	55,70	48,23	0,00	1.614,99	787,24
MI 21-Tangará da Serra	209,05	7,24	6,27	0,00	210,02	102,38
MI 22-Tesouro	805,05	27,90	24,15	0,00	808,80	394,25
Total	24.011,00	832,02	24.011,00	720,33		10.763,29

Para decidir os portos que seriam considerados, foi realizado um levantamento do volume movimentado pelos portos brasileiros entre 2008-2012 (MDIC, 2013), e assim, selecionados os portos que foram significativos para a exportação da soja. Os portos que ocasionalmente são utilizados para o escoamento foram descartados e seus fluxos contabilizados aos portos mais próximos. Logo, os portos selecionados são: Manaus (AM), Santarém (PA), São Luís (MA), Vitória (ES), Santos (SP), Porto de Paranaguá (PR) e São Francisco do Sul (SC).

Os dados referentes à quantidade de soja destinada a cada porto foi retirado da base de dados MDIC (2013), estes valores são apresentados na Tabela 02. Além das informações de soja disponível para exportação e a quantidade de soja escoada por cada porto, também foi realizado um levantamento das rotas de movimentação para exportação, unimodais e intermodais. Com base nas distâncias percorridas pela carga e pelo modal utilizado foi realizado um levantamento do frete cobrado por cada modal, em US\$/tonelada, as tarifas cobradas nos terminais de transbordo e as tarifas portuárias. O resultado são os custos cobrados para as rotas de escoamento e respectivas possibilidades de composições modais.

Para tratar o problema é proposto o modelo CMAHL, apresentado por Ebery (2000):

¹ A produção considerada foi de 21.978,34 mil toneladas que desconta o volume das regiões “demandantes” de soja, ou seja, tem maior capacidade de processamento e não dispõem de soja para exportação, uma vez que consomem toda sua produção. Assim, desconsideraram-se as microrregiões de Alto Araguaia, Cuiabá e Rondonópolis para computar a participação relativa.

² Conforme dados oficiais do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, 2013).

Tabela 02. Quantidade de soja escoada por porto

Descrição do Porto	Total escoado (mil ton)	Descrição do Porto	Total escoado (mil ton)
Manaus (AM)	1.125,31	Santos (SP)	6.344,39
Santarém (PA)	528,11	Porto de Paranaguá (PR)	1.249,30
São Luís (MA)	282,37	São Francisco do Sul (SC)	413,58
Vitória (ES)	782,97		

Considere uma rede completamente conectada $G=(N, A)$, em que $N = \{1, 2, \dots, n\}$ é um conjunto de nós e A é um conjunto de arcos. Um fluxo de carga W_{ij} associado à demanda de cada origem-destino, $(i, j) \in A$ e C_{ij} o custo de enviar uma unidade da carga da origem i para o destino j . A cada custo C_{ij} está associado um custo de coleta, um custo de transferência e um custo de entrega. Cada componente esta relacionada a uma unidade de custo χ , δ e α , logo, χC_{ik} é o custo de coleta, onde i é um nó não-hub e k um hub. Devido à eficiência da transferência de carga entre hubs $\alpha \in [0,1]$ é um fator de desconto econômico e $\chi = \delta = 1$, pois os custos de coleta e de entrega já estão sendo considerados no custo C_{ij} .

Todo nó $k \in N$ é considerado como um local para instalação de um hub e a capacidade de cada localização, quantidade de carga que pode ser recebida e manuseada por um hub, foi determinada por pesquisa de capacidade atual instalada (MDIC, 2013) e, os custos fixos para abrir os hubs foram calculados com base no preço de US\$45,00/tonelada instalada (FERRARI, 2006), como mostra a Tabela 03.

Tabela 03. Capacidade e custo de instalação de hubs para cada nó da rede

Local	Capacidade (ton)	US\$	Local	Capacidade (ton)	US\$
MI-1	54.180,00	2.438.100,00	MI-15	440.202,00	19.809.090,00
MI-2	65.115,00	2.930.175,00	MI-16	5.265.519,00	236.948.355,00
MI-3	1.033.700,00	46.516.500,00	MI-17	3.152.185,00	141.848.325,00
MI-4	28.054,00	1.262.430,00	MI-18	2.311.348,00	104.010.660,00
MI-5	33.170,00	1.492.650,00	MI-19	27.241,00	1.225.845,00
MI-6	8.818.879,00	396.849.555,00	MI-20	2.248.453,00	101.180.385,00
MI-7	776.947,00	34.962.615,00	MI-21	388.157,00	17.467.065,00
MI-8	469.162,00	21.112.290,00	MI-22	383.857,00	17.273.565,00
MI-9	1.701.716,00	76.577.220,00	23-São Simão (GO)/Anhembi (SP)	1.000.000,00	45.000.000,00
MI-10	246.676,00	11.100.420,00	24-Araguari (MG)	1.000.000,00	45.000.000,00
MI-11	618.226,00	27.820.170,00	25-Maringá (PR)	1.000.000,00	45.000.000,00
MI-12	23.711,00	1.066.995,00	26-Porto Velho (RO)	1.000.000,00	45.000.000,00
MI-13	98.144,00	4.416.480,00	27-Porto Nacional (TO)	1.000.000,00	45.000.000,00
MI-14	296.831,00	13.357.395,00			

Além das 22 microrregiões que compõe o estado do Mato Grosso, os pontos de intermodalidade também são considerados nós da rede e, são eles: Porto Velho (RO), São Simão (GO), Araguaia (MG), Maringá (PR), Porto Nacional (TO).

As informações da Tabela 3 sugerem as rotas praticadas na movimentação da soja, a principal delas é a movimentação via Alto Araguaia (MT) até o Porto de Santos. A soja sai da diferentes regiões produtoras por caminhão com destino ao Terminal Ferroviário de Alto Araguaia, na região sudeste do Estado. Deste terminal embarcam na ferrovia e seguem até o Porto de Santos. Outra rota possível e praticada é a movimentação via Porto Velho (RO) até os portos de Manaus e Santarém. A soja segue de caminhão até o Terminal Hidroviário de Santarém que é então carregada nas barcaças e segue até os portos de Manaus e Santarém por hidrovía. Outra rota considerada foi uma rota futura, em função dos novos projetos de infraestrutura desenhados pelo Governo Federal. Dentre elas, destaca-se a rota via Porto Nacional (TO). A soja seguiria de caminhão até o Terminal Ferroviário de Porto Nacional e depois, via ferrovia, até o Porto de São Luís (MA).

Considere como parâmetros do modelo: $N = \{1, \dots, n\}$ o conjunto de nós do problema,

Γ_k a capacidade do hub k , $\forall k \in N$, C_{ij} o custo de utilização do arco (i, j) , $\forall (i, j) \in N$, F_k o custo fixo para abertura de um hub em k , $\forall k \in N$, W_{ij} o volume transportado para cada par origem-destino (i, j) $\forall (i, j) \in N$, $O_i = \sum_{j \in N} W_{ij}$ a quantidade demandada do nó i , $\forall i \in N$, $D_j = \sum_{i \in N} W_{ij}$ - quantidade consumida pelo nó j , $\forall j \in N$.

E as variáveis de decisão: X_{ik} - fluxo de produto do nó i para o hub k , Y_{kl}^i - fluxo do hub k para o hub l com origem em i , Z_{ij}^i - fluxo do hub l com destino em j com origem em i e

$$H_k = \begin{cases} 1 & \text{se o nó } k \text{ é hub, } \forall k \in N \\ 0 & \text{c.c.} \end{cases}$$

Logo, o problema CMAHLP é descrito pela seguinte formulação matemática:

$$\min \sum_i [\chi \sum_k C_{ik} X_{ik} + \alpha \sum_k \sum_l C_{kl} Y_{kl}^i + \delta \sum_l \sum_j C_{lj} Z_{lj}^i] + \sum_k F_k H_k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_k X_{ik} = O_i \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_l Z_{lj}^i = W_{ij} \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$X_{ik} + \sum_l Y_{lk}^i - \sum_l Y_{kl}^i - \sum_j Z_{kj}^i = 0 \quad \forall i, k \quad (4)$$

$$\sum_i X_{ik} \leq \Gamma_k H_k \quad \forall k \quad (5)$$

$$X_{ik} \leq O_i H_k \quad \forall i, k \quad (6)$$

$$\sum_i Z_{ij}^i \leq D_j H_j \quad \forall j, l \quad (7)$$

$$Z_{ij}^i, Y_{kl}^i, X_{ik} \geq 0 \quad \forall k, l, i, j \in N \quad (8)$$

$$H_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N \quad (9)$$

No eq. (1) é descrita a função objetivo do problema, que minimiza o transporte do fluxo de carga da origem até seu destino final e o custo da abertura de hubs. A eq. (2) representa a conservação de fluxo do nó de origem i que pode ser alocado a mais de um hub, no entanto, o fluxo total que sai de i e é destinado a diferentes hubs deve ser igual a todo fluxo que sai de i . A eq. (3) é conservação de fluxo do no destino j , o fluxo que sai de i com destino a j pode passar por diferentes hubs, mas a quantidade desse fluxo sempre deve ser igual à quantidade de fluxo de i para j . A eq. (4) é a conservação nos hubs, todo fluxo que entra em um hub k , que tem origem no nó i não-hub ou em outro hub l , e tudo que sai deste hub, com destino ao nó não-hub j ou a outro hub l , deve ser igual a zero. Na eq. (5) a soma de todo o fluxo destinado ao hub k não pode exceder a sua capacidade. As eq. (6) e (7) garantem que não há fluxo direto entre nós não-hubs e as eq. (8) e (9) definem as variáveis contínuas e binárias, respectivamente.

Na primeira extensão, o modelo pode escolher se, a carga deve passar por um hub ou se pode ser roteada diretamente da origem ao destino. O novo modelo matemático é denominado CMAHLP-D e para sua formulação considere a variável \bar{X}_{ij} que representa o fluxo de produto do nó origem i para o nó demanda j . O problema CMAHLP-D é descrito pela seguinte formulação matemática:

$$\min \sum_i [\sum_j C_{ij} \bar{X}_{ij} + \chi \sum_k C_{ik} X_{ik} + \alpha \sum_k \sum_l C_{kl} Y_{kl}^i + \delta \sum_l \sum_j C_{lj} Z_{lj}^i] + \sum_k F_k H_k \quad (10)$$

Sujeito a:

(4), (5), (6), (7) e (9)

$$\sum_j \bar{X}_{ij} + \sum_k X_{ik} = O_i \quad \forall i \quad (11)$$

$$\bar{X}_{ij} + \sum_l Z_{lj}^i = W_{ij} \quad \forall i, j \quad (12)$$

$$\bar{X}_{ij} \leq O_i - O_i H_i \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$\bar{X}_{ij} \leq D_j - D_j H_j \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$Z_{ij}^i, Y_{kl}^i, X_{ik}, \bar{X}_{ij} \geq 0 \quad \forall k, l, i, j \in N \quad (15)$$

Na função objetivo do problema, eq. (10) é adicionado o termo que representa o fluxo direto, a eq. (11) é a conservação de fluxos em cada nó i , a eq. (12) é a conservação de fluxos no nó j , a eq. (13) e a (14) garantem que o fluxo direto entre a origem i e o destino j só é permitida se i e j não são hubs e a eq. (15) define as variáveis contínuas.

Na segunda extensão, o trabalho propõe uma comparação entre rotear um fluxo pré-definido entre origem-destino (W_{ij}) do modelo CMAHLP e permitir que o próprio modelo matemático decida a quantidade da carga que deve sair de cada origem para atender as demandas, criando o modelo CMAHLP-R.

A formulação matemática do modelo CMAHLP-R é dada por:

(1)

Sujeito a:

(2), (4), (5), (6), (7), (8) e (9)

$$\sum_i \sum_l z_{lj}^i = D_j \quad \forall j \quad (16)$$

A eq. (16) garante que a demanda do nó j é atendida, no entanto, a origem do fluxo não é definida.

E a terceira extensão, é uma variação do modelo CMAHLP-D para que este modelo também roteie o fluxo. Esta extensão é denominada CMAHLP-DR e, sua formulação matemática é:

(10)

Sujeito a:

(4), (5), (6), (7), (9), (11), (13), (14) e (15)

$$\sum_i (\bar{X}_{ij} + \sum_l z_{lj}^i) = D_j \quad \forall j \quad (17)$$

A eq. (17) garante que a demanda do nó j é atendida por fluxo direto entre origem-destino ou roteado por hubs e, a origem do fluxo é definida pelo modelo.

RESULTADOS COMPUTACIONAIS

De acordo com a formulação matemática do problema CMAHLP e CMAHLP-D é necessário conhecer a quantidade que carga que sai de uma origem para determinado destino (W_{ij}). Para obter estes valores foi utilizado o problema de fluxos em redes com o objetivo de minimizar o custo de transporte $\{\min z = cx: Ax=b, 0 \leq x \leq \infty\}$. O resultado obtido pelo problema de fluxos em redes é apresentado na Tabela 04.

Tabela 04. Matriz de fluxos (W_{ij}) em toneladas.

	SANTARÉM /MANAUS	SÃO LUÍS	VITÓRIA	SANTOS	PARANAGUÁ	SÃO FRANC. DO SUL
MI-2	33.647,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-4	6.957,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-5	0,00	0,00	0,00	0,00	79.649,80	0,00
MI-6	0,00	0,00	0,00	3.767.557,91	0,00	0,00
MI-7	717.144,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-8	275.337,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-9	0,00	0,00	782.969,66	421.343,55	0,00	0,00
MI-10	48.410,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-12	3.688,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MI-13	0,00	0,00	0,00	25.161,91	0,00	0,00
MI-14	0,00	0,00	0,00	271.853,23	0,00	0,00
MI-15	0,00	0,00	0,00	300.867,16	0,00	0,00
MI-16	465.862,87	0,00	0,00	869.276,48	656.629,20	0,00
MI-17	0,00	0,00	0,00	294.074,00	0,00	450.835,05
MI-19	0,00	0,00	0,00	0,00	8.164,20	0,00
MI-20	0,00	282.374,84	0,00	0,00	504.861,17	0,00
MI-21	102.377,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

MI-22	0,00	0,00	0,00	394.252,28	0,00	0,00
-------	------	------	------	------------	------	------

Os problemas propostos foram implementados em CPLEX 12.4 e os testes realizados em um computador i3 2.20GHz de 4GB em sistema operacional Ubuntu 11.04.

As Tabelas 05 a 11 apresentam as análises dos resultados computacionais. As colunas indica o número de hubs abertos, o custo total de transportar a carga e abrir os hubs, as localizações onde os hubs são abertos, o quanto é utilizado apenas para abertura dos hubs e o custo de transporte da carga dada a abertura dos hubs, respectivamente.

A Tabela 05 apresenta os resultados obtidos para o modelo CMAHLP considerando que o investimento para abertura dos hubs é pago integralmente no início da operação.

Tabela 05. Modelo CMAHLP com pagamento integral no 1º período

Nº Hubs	Custo Total (US\$)	Hubs = { }	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
9	1.687.370.000,00	3 11 17 18 21 23 25 26 27	517.662.720,00	1.169.707.280,00
10	1.688.080.000,00	3 11 17 18 19 21 23 25 26 27	518.888.565,00	1.169.191.435,00
11	1.687.800.000,00	2 11 13 17 18 21 23 24 25 26 27	523.492.875,00	1.164.307.125,00
12	1.686.640.000,00	2 11 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	524.718.720,00	1.161.921.280,00
13	1.685.690.000,00	2 5 11 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	526.211.370,00	1.159.478.630,00
14	1.685.800.000,00	2 3 8 11 13 15 17 21 22 23 24 25 26 27	524.193.660,00	1.161.606.340,00
15	1.684.760.000,00	2 3 8 11 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	525.419.505,00	1.159.340.495,00
16	1.684.200.000,00	2 3 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	526.486.500,00	1.157.713.500,00
17	1.684.580.000,00	3 4 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	525.244.410,00	1.159.335.590,00
18	1.685.050.000,00	1 2 3 4 5 8 11 12 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	527.263.200,00	1.157.786.800,00

Observe que, considerando o investimento total a ser realizado, o modelo sugere a abertura de 16 hubs, o que significa investir US\$ 526 milhões na abertura de hubs. Os resultados são aderentes ao contexto real da demanda logística da soja mato-grossense. Se tomarmos o exemplo de Alto Araguaia, este é caracterizado como um importante ponto de transbordo ferroviário, que compõe um das principais opções logísticas para a exportação da soja, assim o hub é necessário e justificado. Da mesma forma, para as regiões de São Simão, Maringá, Porto Velho e Porto Nacional, importantes terminais de transbordo ferroviário e hidroviário, que caso alcancem um nível adequado de armazenagem, podem ampliar as movimentações, implicando numa redução dos custos logísticos em função dos ganhos com a intermodalidade com a prática dessas rotas. Já regiões como Paranatinga e Tesouro, importantes produtoras, detêm altos índices de déficit de armazenagem, o que explica a abertura dos hubs.

Ao realizar uma análise em torno do número ótimo de hubs, fica evidente que neste caso, aumentar o número de hubs abertos não beneficia o transporte. É possível que haja uma configuração com um número maior de hubs que beneficie mais o transporte, mas esta configuração se distanciaria de modo mais significativo em termos de custo total e da proposta de análise do *trade off* entre o custo total e o custo de transporte.

Considerando que o investimento para abertura de hubs não é realizado integralmente no momento do início da operação, mas sim, que este investimento é normalmente financiado a uma taxa de juros e, o pagamento desse financiamento é realizado em um horizonte de tempo, a Tabela 06 mostra o impacto do parcelamento da abertura dos hubs no planejamento da rede.

Supondo uma taxa de financiamento de 10% e o horizonte de tempo de 10 anos para o pagamento, o valor das parcelas anuais para construir cada hub foi calculado segundo Thuesen e Fabrycky (2001) onde, dado o valor que será financiado (F), a taxa de juros do financiamento (i) e o número de anos em que o valor será quitado (n), o parcela anual (P) é dada por: $P = F[i(1+i)^n / ((1+i)^n - 1)]$.

Tabela 06. Modelo CMAHLP com pagamento anual do investimento

Nº Hubs	Custo Total (US\$)	Hubs = {}	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
14	1.244.880.000,00	2 5 11 12 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	85.840.917,82	1.159.039.082,18
15	1.244.390.000,00	1 2 3 8 11 13 15 17 21 22 23 24 25 26 27	85.735.650,53	1.158.654.349,47
16	1.243.430.000,00	2 3 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	85.712.002,20	1.157.717.997,80
17	1.243.370.000,00	2 3 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	85.955.005,62	1.157.414.994,38
18	1.243.470.000,00	2 3 4 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	86.160.529,22	1.157.309.470,78
19	1.243.870.000,00	1 2 3 4 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	86.557.451,90	1.157.312.548,10

O valor ótimo de investimento resultante do modelo para a abertura de hubs com financiamento é de 17 hubs a um custo total de US\$ 1.243 milhões.

Comparando a Tabela 05 e a Tabela 06 é possível observar que para 17 hubs (Tabela 06) o modelo realiza escolhas distintas de localizações para abertura de hubs quando comparado às localidades escolhidas para 17 hubs (Tabela 05) e resulta num custo menor de transporte. No entanto, neste caso, o menor custo de transporte é obtido para configuração de rede com 18 hubs, que implica num aumento de US\$ 100 mil no custo total.

Os resultados para o CMAHLP-D, tanto para pagamento integral do investimento como no caso do financiamento, evidencia a importância de trabalhar o problema multi-períodos. No caso do pagamento integral do investimento, o modelo abriu um único hub, na localidade 27, que viabiliza a rota intermodal com destino ao porto de São Luís, e as demais entregas são realizadas através de ligação direta a um custo total de US\$ 1.183.680.000,00, um custo de abertura de hubs de US\$ 45.000.000,00 e um custo de transporte de US\$ 1.138.680.000,00. Este resultado é justificado pelo fato do investimento para abertura de hub ser alto e superar a economia de escala no transporte. Ao considerar que o investimento é financiado, o modelo abre 5 hubs (Tabela 7) um número significativamente menor do que os 17 hubs abertos pelo modelo CMAHLP com pagamento anual (Tabela 06) e ainda resulta em economia no custo de transporte e custo total quando comparado aos custos para 17 hubs.

Tabela 07. Modelo CMAHLP-D com pagamento anual do investimento

Nº Hubs	Custo Total (US\$)	Hubs = {}	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
3	1.123.850.000,00	11 25 27	8.671.667,08	1.115.178.332,92
4	1.123.240.000,00	11 19 25 27	8.761.890,34	1.114.478.109,66
5	1.123.190.000,00	5 11 19 25 27	8.871.750,67	1.114.318.249,33
6	1.123.310.000,00	5 11 12 19 25 27	8.950.282,44	1.114.359.717,56

Os resultados do modelo CMAHLP-R, na Tabela 08, permitem uma comparação direta entre as vantagens de trabalhar na rede com os fluxos pré-definidos (Tabela 05) e de permitir que o modelo roteie o fluxo de modo a minimizar os custos.

Para o pagamento integral do investimento, o modelo CMAHLP-R abre hubs em 9 localidades a um custo total de US\$ 1.668 milhões, enquanto que para o fluxo pré-definido

são abertos 16 hubs a um custo total de US\$ 1.684 milhões. No entanto, o fator mais expressivo da flexibilidade do fluxo é expresso pelo custo de transporte, onde a economia é de aproximadamente US\$ 7 milhões, mesmo com a redução do número de hubs, quando a mesma comparação é feita para 9 hubs abertos para o modelo CMAHLP o impacto econômico se torna mais evidente. Os custos em investimento de infraestrutura e as localidades escolhidas para instalação de hubs, neste caso, são os mesmos, no entanto, o modelo CMAHLP-R resulta em uma economia de aproximadamente US\$ 20 milhões no custo total, resultado da economia obtida pelo custo de transporte. A análise do *trade off* mostra que para 16 hubs abertos, a um investimentos total a mais de US\$ 260 mil, obtém-se uma economia em transporte de aproximadamente US\$ 8 milhões. Ao comparar a abertura de 16 hubs do modelo CMAHLP e CMAHLP-R (Tabelas 05 e 08, respectivamente), observa-se que a economia obtida pelo CMAHLP-R é de aproximadamente US\$ 16 milhões.

Tabela 08. Modelo CMAHLP-R com pagamento integral no 1º período

Nº Hubs	Custo Total (US\$)	Hubs = { }	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
7	1.711.510.000,00	9 17 18 23 25 26 27	502.436.205,00	1.209.073.795,00
8	1.682.380.000,00	3 11 17 18 23 25 26 27	500.195.655,00	1.182.184.345,00
9	1.668.500.000,00	3 11 17 18 21 23 25 26 27	517.662.720,00	1.150.837.280,00
10	1.669.220.000,00	3 11 17 18 19 21 23 25 26 27	518.888.565,00	1.150.331.435,00
11	1.670.100.000,00	3 11 12 17 18 19 21 23 25 26 27	519.955.560,00	1.150.144.440,00
12	1.669.990.000,00	2 11 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	524.718.720,00	1.145.271.280,00
13	1.669.030.000,00	2 5 11 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	526.211.370,00	1.142.818.630,00
14	1.669.620.000,00	2 5 11 12 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	527.278.365,00	1.142.341.635,00
15	1.669.310.000,00	2 3 8 11 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	525.419.505,00	1.143.890.495,00
16	1.668.760.000,00	2 3 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	526.486.500,00	1.142.273.500,00
17	1.669.110.000,00	3 4 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 13 14 25 26 27	526.311.405,00	1.142.798.595,00

A Tabela 09 apresenta os resultados do modelo CMAHLP-R considerando o pagamento anual do investimento e a melhora obtida em termos de custos é muito expressiva quando comparado ao resultado CMAHLP para pagamento anual do investimento. O modelo CMAHLP-R abre 16 hubs enquanto o modelo CMAHLP abre 17, no entanto, a diferença em termos de custo total é de mais de US\$ 100 milhões e, esta diferença é, em sua maioria, reflexo da economia obtida pelo transporte. Já análise do *trade off*, neste caso, mostra que o resultado ótimo é a melhor opção, pois o menor custo de transporte é o do resultado ótimo e a redução no custo de investimento resulta em um custo total elevado.

Tabela 09. Modelo CMAHLP-R com pagamento anual do investimento

Nº Hubs	Custo Total(US\$)	Hubs = { }	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
14	1.181.010.000,00	2 3 5 11 12 17 18 19 21 23 24 25 26 27	41.906.744,79	1.139.103.255,21
15	1.181.050.000,00	2 3 5 11 12 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	42.231.801,56	1.138.818.198,44
16	1.138.260.000,00	2 3 5 6 11 12 13 17 18 19 21 23 24 25 26 27	71.440.274,27	1.066.819.725,73
17	1.180.900.000,00	2 3 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	38.859.725,05	1.142.040.274,95
18	1.180.940.000,00	2 3 4 5 8 11 12 13 15 17 19 21 22 23 24 25 26 27	38.952.641,00	1.141.987.359,00

A análise dos resultados do modelo CMAHLP-RD é semelhante a análise do modelo CMAHLP-D. Para o pagamento integral do investimento no 1º período obtêm-se um custo total de US\$ 1.183.680.000,00. O mais importante a ser destacado nestes resultados é o valor ótimo apresentado na Tabela 10, que obteve o menor custo total, reflexo do menor custo de transporte, quando comparado com todas as análises realizadas para os modelos anteriores.

Tabela 10. Modelo CMAHLP-RD com pagamento anual do investimento

Nº Hubs	Custo Total (US\$)	Hubs = { }	Abertura Hubs (US\$)	Transporte (US\$)
4	1.112.950.000,00	11 19 25 27	8.761.890,34	1.104.188.109,66
5	1.112.630.000,00	5 11 19 25 27	8.871.750,67	1.103.758.249,33
6	1.112.410.000,00	5 11 12 19 25 27	8.950.282,44	1.103.459.717,56
7	1.112.520.000,00	4 5 11 12 19 25 27	9.043.198,38	1.103.476.801,62

A análise do *trade off* dos resultados da Tabela 10 também não apresenta opções significativas para tomada de decisão pois, o menor custo de transporte é o custo do resultado ótimo e o menor custo de investimento causa um aumento de aproximadamente US\$ 500 mil do custo total e um aumento de aproximadamente US\$ 1 milhão do custo de transporte, o que não seria vantajoso no longo prazo.

CONCLUSÃO

O modelo proposto por este trabalho para rotear a soja destinada para exportação foi o modelo CMAHLP, que abre os hubs e roteia os fluxos de forma a minimizar o custo total, isto não implica necessariamente em minimizar o custo de abertura de hubs e/ou custo de transporte.

No intuito de melhor descrever o problema real foram propostos 3 extensões do problema: CMAHLP-D, CMAHLP-R e CMAHLP-RD. além da análise dos 4 modelos no caso em que o investimento em infraestrutura é pago dentro de um horizonte de tempo.

A comparação dos resultados obtidos pelos modelos CMAHLP e CMAHLP-R permite afirmar que a liberdade do modelo rotear o fluxo resulta em melhores resultados e se mostra mais adequado para o sistema. Já ao considerar os prazos para o pagamento dos investimentos causa reflexo positivo na escolha de hubs e no resultado obtido pelos modelos. Porém, este trabalho considera um único período de tempo, o permite a conclusão de que ao considerar um número maior de períodos, o resultado obtido não corresponderá à realidade, sendo insuficiente para escoar a soja.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALUMUR, S.; KARA, B. Y. **Network hub location problems: The state of the art**. European Journal of Operational Research, v. 190, n. 1, 2008.

AMARAL, M.; ALMEIDA, M. S.; MORABITO, R. **Um modelo de localização de terminais intermodais para exportação de soja no Brasil**. Simpósio de Pesquisa Operacional & Logística da Marinha, 2009.

AVERSA, R.; BOTTER, H. E.; HARALAMBIDES, R. C.; YOSHIZAKI, H. T. Y. **A mixed integer programming model on the location of a hub port in the east coast of South America**. Maritime Economics and Logistics, 2005.

AYKIN, T. **Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem**. European Journal of Operational Research, v. 79, n. 3, 1994.

CAMPBELL, J. F. **Integer programming formulations of discrete hub location problems.** European Journal of Operational Research, v. 72, p.387-405, 1994.

DUBKE, A. F.; PIZZOLATO, N. D. **Location model of specialized terminals for soybean exports in Brazil.** Pesquisa Operacional, 2011.

EBERY, J.; KRISHNAMOORTHY, M.; ERNST, A.; BOLAND, N. **The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms.** European Journal of Operational Research, v. 120, p. 614-631, 2000.

IMEA - INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA, 2013. Disponível em: <http://www.imea.com.br>

JEONG, S. J.; LEE, C. G.; BOOKBINDER, J. H. **The European freight railway system as a hub-and-spoke network.** Transportation Research Part A, v. 41, n. 6, 2007.

MDCI-MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO, 2013. Disponível em: <http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br>.

PINHEIRO, M. A.; CAIXETA-FILHO, J. V. **O escoamento da soja em grão do Mato Grosso para exportação pelos portos de Santos. Paranaguá e Itaquí: uma aplicação de programação linear.** Sociedade Brasileira de economia Administração e Sociologia Rural, 2010.

FERRARI, R. C. **Utilização de modelo matemático de otimização para identificação de locais para instalação de unidades armazenadoras de soja no estado de Mato Grosso.** Piracicaba, 2006, 185p. Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, A. L. R. **Transporte de soja do Estado do Mato Grosso para exportação: uma aplicação de programação linear.** Revista de Economia Agrícola, São Paulo, v. 54, p. 33-41, 2007.

OLIVEIRA, A. L. R. **A logística agroindustrial frente aos mercados diferenciados: principais implicações para a cadeia da soja.** Informações Econômicas, v. 41, n. 6, 2011.

PEIXOTO, N. E. S.; PINTO, K. C. R. **Rede de fluxo de custo mínimo para a soja destinada ao processamento no centro-sudeste brasileiro.** Simpósio de Pesquisa Operacional & Logística da Marinha, 2012.

THUESEN, G. J.; FABRYCKY, W. J. Engineering economy, 9th ed., Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2001, 637p.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2013. Disponível em: <http://www.usda.gov>