

Um estudo sobre localização de terminais intermodais na rede de escoamento da soja brasileira

Marina Soares Almeida^{a*}, Mônica do Amaral^b, Reinaldo Morabito^a

^aUniversidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil

^bUniversidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, MG, Brasil

*marinasoares@dep.ufscar.br

Resumo

A soja é um dos principais produtos agrícolas brasileiros. Do total colhido, aproximadamente 40% é destinado à exportação. Como as lavouras estão concentradas principalmente na região central no país, essa soja percorre, em geral, grandes distâncias até os portos marítimos. Nesse caso, o transporte intermodal pode tornar mais eficiente e econômica a movimentação de grandes volumes por longas distâncias. Analisa-se, neste estudo, a aplicação de um modelo de programação matemática para apoiar decisões de fluxo de soja e localização de terminais intermodais. Com base em dados secundários, foram propostas três redes alternativas de escoamento, com diferentes áreas de abrangência e possibilidade de utilização de ferrovias ainda em construção ou projeto. Foram considerados os principais estados produtores e movimentadores da soja. Experimentos computacionais resultaram em fluxos de escoamento e localização de terminais condizentes com a realidade. Cenários alternativos da rede também foram analisados, evidenciando o potencial de análise dessa ferramenta de otimização.

Palavras-chave

Rede de escoamento de soja. Programação linear inteira mista. Problema de localização de instalações. Fluxos em redes. Terminais intermodais.

1. Introdução

O cultivo da soja foi iniciado no Brasil no começo da década de 1960, na região Sul, como cultura de verão em sucessão ao trigo, que era o principal produto agrícola cultivado nessa região. Em meados dessa mesma década, a soja passou a ser produzida em quantidades mais expressivas. Isso aconteceu em decorrência do crescimento das criações de suínos e aves, demandando grandes volumes de farelo de soja para a alimentação desses animais (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2012). Com o passar dos anos, as lavouras de soja foram se deslocando da região Sul para as regiões Centro-Oeste, Sudeste e, mais recentemente, para a região Norte. O mapa da Figura 1 ilustra esse deslocamento. A área mais clara representa o cultivo do grão em 1970 e a mais escura, abrangendo grande parte do território brasileiro, representa a área cultivada em 2003.

Atualmente, a soja é o principal grão cultivado no Brasil, tendo sido responsável no ano de 2007

por 44% da produção nacional. Isso faz do Brasil o segundo maior produtor mundial, ficando atrás somente dos Estados Unidos. A safra de 2008/2009, por exemplo, atingiu uma produção de aproximadamente 50 milhões de toneladas numa área de 21 milhões de hectares plantados (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009; Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2009). Cerca de 40% da soja produzida no país é exportada *in natura*. Segundo a ABIOVE (Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2012), em 2011, o complexo da soja, também formado pelo farelo e o óleo, foi responsável pela movimentação de 24 bilhões de dólares em exportações e gerou mais de 1,5 milhão de empregos.

Em função desse grande mercado agrícola, o Brasil vem enfrentando grandes desafios para transportar percentuais significativos das safras do interior do país para o litoral. Isso porque a interiorização da produção da soja, mostrada na Figura 1, aconteceu

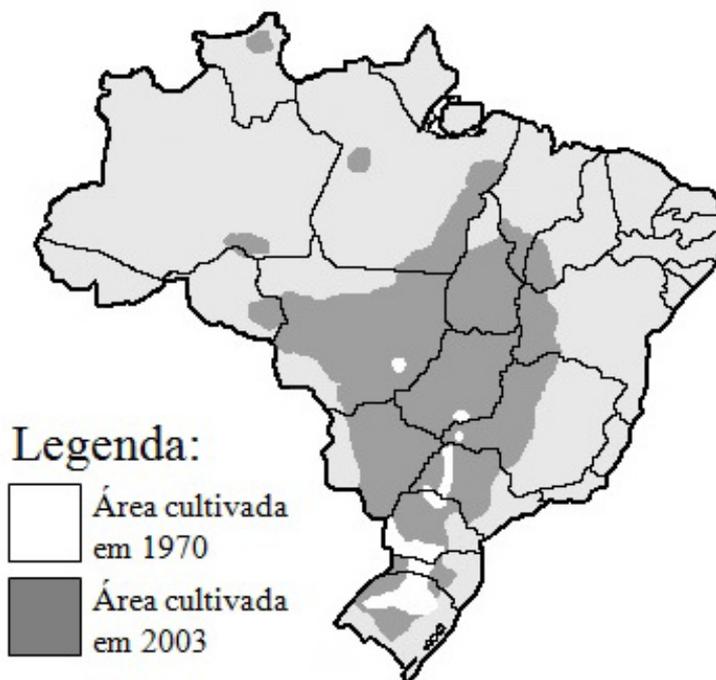


Figura 1. Áreas de cultivo da soja em 1970 e 2003. Fonte: Amaral (2003).

em paralelo com o aumento de sua participação na pauta de exportações, expondo a realidade deficiente do sistema de transporte de cargas. Dessa forma, urge a necessidade de melhorias da estrutura logística disponível e, principalmente, dos envolvidos na exportação dos produtos agrícolas atuarem de forma integrada, tendo em vista a redução dos custos totais (Ojima, 2007). Nesse sentido, a intermodalidade surge como uma alternativa promissora para garantir maior eficiência e economia no transporte de cargas.

A intermodalidade é reconhecida mundialmente pela sua capacidade de redução dos custos logísticos, principalmente quando as áreas de oferta e demanda se encontram bastante dispersas (Chang, 2008). Desde o decreto 1.563/95, o Governo Federal tem regulamentado e incentivado esse tipo de transporte, por meio da concessão de licença para operadores de transporte nessa modalidade (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2012). No entanto, a eficiência em custos do transporte intermodal de cargas não depende só da disponibilidade dos modais e de empresas habilitadas a realizá-lo, mas também da existência de estruturas de apoio, como os terminais intermodais.

O objetivo principal deste trabalho é analisar a aplicação do modelo de otimização proposto em Amaral et al. (2012) para apoiar decisões de fluxo

e localização de terminais intermodais na rede brasileira de escoamento da soja em grão destinada à exportação. Por meio da proposição de três redes alternativas de escoamento, foi realizado um estudo de cenários. Para compor essas redes, foram considerados os principais estados produtores e movimentadores de soja, além de diferentes combinações de vias rodoviárias, ferroviárias e hidroviárias fluviais até os principais portos brasileiros. Salienta-se que esse modelo explora a intermodalidade do transporte e foi desenvolvido com base nos modelos de Arnold et al. (2001, 2004), que foram apresentados fora de contextos agroindustriais. Uma contribuição deste trabalho é mostrar o potencial de análise dessa abordagem para apoiar decisões práticas de fluxo de soja e localização de terminais intermodais. Porém, deve-se salientar também, como contribuição, a proposição dessas redes alternativas, uma vez que a proposta mais recente de que se tem conhecimento foi apresentada em GEIPOT (Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, 2009), que conta com duas redes, uma definida para o ano de 2000 e outra projetada para o ano de 2015.

Além de Amaral et al. (2012), não se tem conhecimento de outros trabalhos na literatura com o mesmo enfoque. Alguns trabalhos relacionados ao agronegócio da soja aparecem, por exemplo, em

Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009) e também nos estudos anteriores do GEIPOT (Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, 2009). Os maiores produtores de cada estado foram considerados pontos de origem e estão representando não só suas próprias produções, mas a produção da sua região como um todo, ou seja, cada ponto de origem está funcionando como um centroide da sua região. A maior parte das regiões de oferta está no Estado do Mato Grosso, o maior produtor de soja do país, conectado apenas pela malha rodoviária. Os grandes volumes produzidos nessa região podem ser transportados por ferrovia até os portos a partir dos terminais intermodais de Alto Araguaia-MT e Alto Taquari-MT.

Os pontos de destino foram definidos com base em estudo do GEIPOT (Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, 2009): Rotterdam, na Holanda, e Shangai, na China. O primeiro, representando a demanda da Comunidade Europeia, e o segundo, a demanda do Leste Asiático, que são os principais consumidores da soja brasileira. Com base em informações disponibilizadas pelo IEA (Instituto de Economia Agrícola, 2010), determinou-se que 77% do total da soja exportada é destinado ao mercado europeu, cujo acesso é o porto de Rotterdam, na Holanda, e os 23% restantes, ao mercado asiático (Instituto de Economia Agrícola, 2010).

É possível observar que, a partir dos estados do Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais e, principalmente, do Estado de São Paulo, já é possível contar com uma malha ferroviária capaz de escoar grandes volumes de soja. No entanto, a soja compete em capacidade com outros produtos exportados pelos portos das regiões Sudeste e Sul. A Ferronorte, que liga Alto Araguaia-MT a Aparecida do Taboado-MS, tem praticamente toda a sua capacidade no fluxo em direção ao porto ocupada com o transporte da soja em

grão do Centro-Oeste. Essa ferrovia dá acesso direto à malha sob concessão da Ferrobán, no Estado de São Paulo, chegando diretamente ao porto de Santos.

Em relação aos terminais intermodais, ressalta-se que é feita a distinção do modal aquaviário entre os modais hidroviário (H) em marítimo (M), pela necessidade de transbordo entre as embarcações. Disso resulta o fato de os portos serem considerados como terminais intermodais. Todos os cinco portos considerados realizam transbordo dos modais rodoviário (R) e ferroviário (F) para o marítimo (Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2012). Os terminais intermodais da Rede 1 são mostrados na Tabela 1.

Há três hidrovias que servem de alternativa para o transporte da soja. A hidrovia do rio Paraguai, que liga Cáceres-MT a Corumbá-MS, a hidrovia dos rios Paranaíba e Tietê, que liga São Simão-GO a Pederneiras-SP, e a hidrovia dos rios Paranaíba e Paraná, que liga São Simão-GO aos municípios de Aparecida do Taboado-MS, Três Lagoas-MS, Panorama-SP, Presidente Epitácio-SP e Euclides da Cunha Paulista-SP, todos localizados ao longo da fronteira entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

2.2. Rede 2: Inclusão de áreas de plantio e portos das regiões Norte e Nordeste

Com base em trabalhos encontrados na literatura, como os estudos em GEIPOT (Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, 2009) e Ojima (2007), seguiu-se à proposição de uma segunda rede. Esses trabalhos sugerem a importância e a necessidade de se estudar os impactos que o escoamento de produtos agrícolas por portos das regiões Norte e Nordeste podem causar para o sistema de transportes do Brasil. Essa rede, de maior abrangência, tem por objetivo levar à compreensão dos fluxos da soja em

Tabela 1. Terminais intermodais da Rede 1.

Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações			
	R	F	H	M		R	F	H	M		R	F	H	M
AAR-MT	x	x			GOI-GO	x	x			PPO-MS	x	x		
APT-MS	x	x	x		GUA-PR	x	x			PEP-SP	x	x	x	
BHO-MG	x	x			ITA-SP	x	x			SAN-SP	x	x		x
CAC-MT	x		x		LON-PR	x	x			SFS-SC	x	x		x
CGR-MS	x	x			MAF-SC	x	x			SPA-SP	x	x		
CAS-PR	x	x			MAC-MS	x	x			SSI-GO	x		x	
CDS-MS	x	x			MAR-PR	x	x			TLA-MS	x	x	x	
COL-SP	x	x			PAN-SP	x	x	x		UBE-MG	x	x		
COR-MS	x	x	x		PAR-PR	x	x		x	UVI-PR	x	x		
CUR-PR	x	x			PED-SP	x	x	x		VIT-ES	x	x		x
EPA-SP	x	x	x		PGR-PR	x	x							

Fonte: Elaborado pelos autores.

grão em uma região do Brasil com grande potencial de aproveitamento logístico. A Figura 3 mostra a Rede 2, que é composta pela Rede 1 e alguns estados das regiões Norte e Nordeste.

Ao se considerar as regiões Norte e Nordeste, incluíram-se novas regiões produtoras. Foram incluídos como origens os municípios de Balsas-MA e Barreiras-BA, reconhecidos como grandes produtores nacionais do grão. A Tabela 2 exhibe as regiões de oferta consideradas

nas três redes de escoamento propostas. Na região Norte e na parte da região Nordeste considerada, há maior concentração de hidrovias. De Oeste para Leste, tem-se a hidrovia do rio Madeira entre Porto Velho-RO e o porto de Itacoatiara-AM e um trecho do rio Amazonas ligando Careiro-AM ao porto de Itacoatiara-AM. Também a hidrovia de Cachoeira Rasteira-MT ao porto de Santarém-PA, formada pelos rios Teles Pires e Tapajós; a hidrovia dos rios

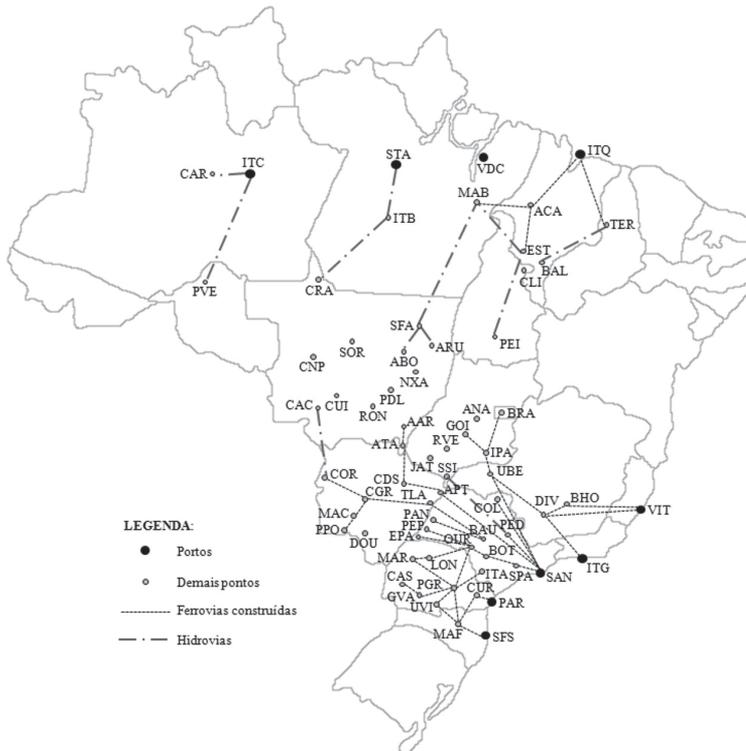


Figura 3. Principais ferrovias, hidrovias e portos da Rede 2. Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 2. Regiões de oferta de soja.

Centroide	Quantidade ofertada (t)	Rede 1	Rede 2	Rede 3
CNP-MT	1.597.023,00	x	x	x
NXA-MT	881.731,00	x	x	x
PDL-MT	667.692,00	x	x	x
RON-MT	709.867,00	x	x	x
SOR-MT	3.282.184,00	x	x	x
ANA-GO	695.504,00	x	x	x
JAT-GO	959.076,00	x	x	x
RVE-GO	995.710,00	x	x	x
UBE-MG	1.055.209,00	x	x	x
CGR-MS	286.247,00	x	x	x
CDS-MS	329.695,00	x	x	x
DOU-MS	1.170.081,00	x	x	x
CAS-PR	3.947.411,00	x	x	x
BAL-MA	400.391,00		x	x
BAR-BA	856.302,00		x	x

Fonte: Elaborado pelos autores.

das Mortes e rio Araguaia que liga Aruanã-MT e Água Boa-MT a Marabá-PA; a hidrovia do rio Tocantins que sai de Peixes-TO, passa por Estreito-MA e chega a Marabá-PA; por fim, a hidrovia que liga Balsas-MA a Terezina-PI, formada pelo rio Parnaíba.

Os únicos trechos de ferrovias que foram incluídos na Rede 2 estão nos estados de Pará e Maranhão. Uma porção da Estrada de Ferro Carajás (EFC), que sai de Marabá-PA, passa por Açailândia-MA e termina no porto de Itaqui-MA, é utilizada para o transporte de soja, além de um pequeno trecho da Ferrovia Norte-Sul, ligando Estreito-MA a Açailândia-MA e, por fim, um trecho de ferrovia da Companhia Ferroviária do Nordeste (CFN), ligando Terezina-PI ao porto de Itaqui-MA. Com a consideração desses trechos, houve um acréscimo no número de terminais intermodais considerados, que é mostrado na Tabela 3.

O mapa da Rede 2 na Figura 4 mostra que há uma área central, formada por parte dos estados do Mato Grosso e de Goiás, pouco conectada com as hidrovias e à malha ferroviária. É uma região que produz e movimentada grandes volumes de soja, percorrendo grandes distâncias no modal rodoviário. Vale salientar que, para efeito de visualização, estão representadas no mapa da Figura 4 apenas as rodovias da região central, principalmente no Estado do Mato Grosso, onde praticamente não há ferrovias ou hidrovias.

2.3. Rede 3: Inclusão de ferrovias em projeto nas rotas de escoamento da soja

Com base nas informações dos estudos mencionados anteriormente e no que vem sendo apresentado pelo Governo, foi proposta a Rede 3, para analisar

Tabela 3. Terminais intermodais acrescidos na Rede 2.

Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações			
	R	F	H	M		R	F	H	M		R	F	H	M
ACA-MA	x	x			EST-MA	x	x			PVE-RO	x		x	
ABO-MT	x		x		ITB-PA	x		x		STA-PA	x		x	x
ARU-MT	x		x		ITC-AM			x	x	TER-PI	x	x	x	
BAL-MA	x		x		ITQ-MA	x	x		x	VDC-PA	x		x	x
CRA-MT	x		x		MAB-PA	x	x	x						
CAR-AM	x		x		PEI-TO	x		x						

Fonte: Elaborado pelos autores.

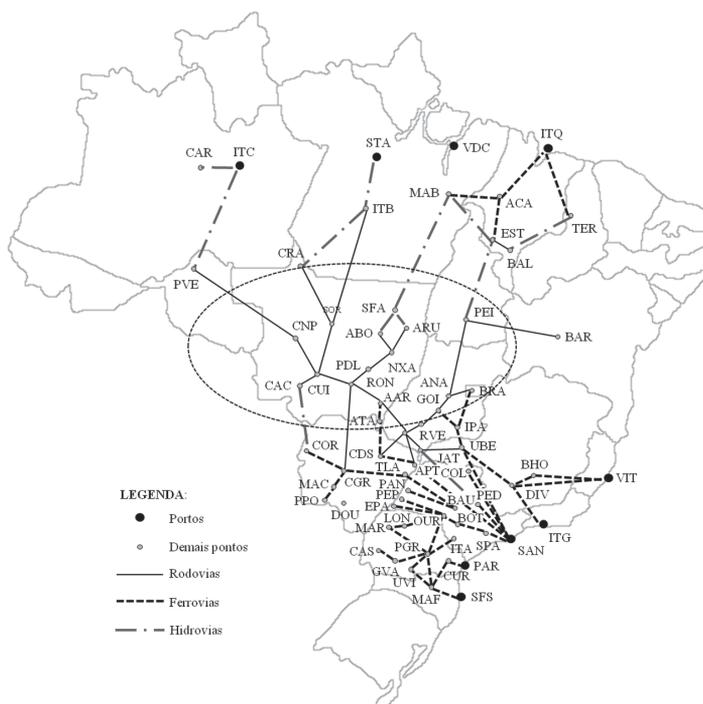


Figura 4. Rodovias da região central do Brasil consideradas na Rede 2. Fonte: Elaborado pelos autores.

o impacto da construção dos trechos de ferrovias que estão planejados. Como é possível observar no mapa da Figura 5, há três ferrovias ainda em projeto. Na região Sul, a extensão da Ferroeste deverá sair de Cascavel-PR para Maracaju-MS, onde se encontra com a Novoeste. Esta extensão passará por Dourados-MS, grande produtor de soja do estado e que hoje possui apenas ligações rodoviárias.

Interligando a região dos estados do Mato Grosso e Goiás, a extensão da Ferronorte deverá seguir, a Leste, até Uberlândia-MG, passando a ter acesso às Ferrovias Norte-Sul, Centro-Atlântica e Ferroban e, a Oeste, a Ferronorte deverá seguir em direção a Cuiabá-MT, onde se divide em dois trechos, com destino a Porto Velho-RO e a Santarém-PA. Ressalta-se que a Ferronorte deverá passar por municípios responsáveis por grande parte da produção de soja em grão do país, como Vilhena-RO, Jataí-GO e Uberlândia-MG.

O último trecho de ferrovia previsto deverá ligar trechos já construídos da Ferrovia Norte-Sul. Há um trecho da ferrovia que liga Estreito-MA a Açailândia-MA e outro que liga Uberlândia-MG a Anápolis-GO. O objetivo do projeto é ligar esses dois trechos, construindo a estrada de ferro ligando Anápolis-GO e Estreito-MA, além de Açailândia-MA ao porto de Vila do Conde. Note que, com estas extensões, as regiões dos estados do Mato Grosso

e de Goiás deixarão de ser conectadas apenas por rodovias. Os terminais intermodais acrescentados na Rede 3 são mostrados na Tabela 4.

Alguns estudos trataram do potencial da Ferronorte e da Ferrovia Norte-Sul, respectivamente, em atender à demanda por transporte ferroviário em sua área de influência. O que se observou, em ambos os estudos citados, foi que esses novos trechos absorveriam de imediato a oferta de produtos dessas áreas. Convém mencionar que, em nenhum destes estudos, foram considerados custos fixos de instalação da estrada de ferro e de infraestrutura de apoio, como terminais e armazéns. Nesse caso, a análise da vantagem econômica do transporte ferroviário, foi baseada apenas no valor do frete por tonelada de produto. No entanto, Brito (2010) chamou a atenção para uma questão que denominou de “situação inédita”. Na área de abrangência do porto de Itaqui-MA, atualmente, o custo ferroviário para o transporte de soja era equivalente ao custo rodoviário.

3. Resultados e análises da aplicação do modelo

Os testes computacionais com as redes propostas foram realizados com o modelo matemático mostrado no Apêndice A. Utilizou-se um microcomputador Core

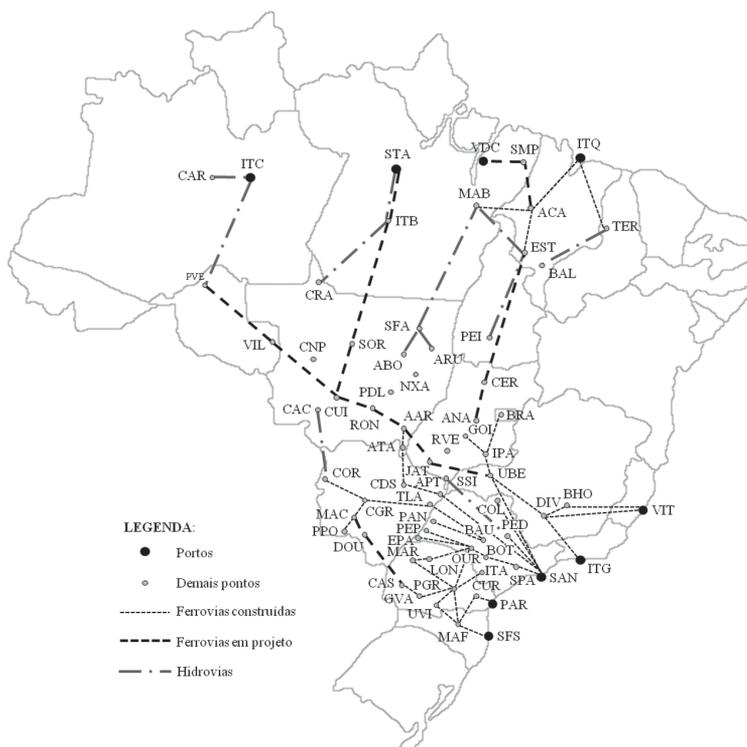


Figura 5. Ferrovias em projeto consideradas na Rede 3. Fonte: Elaborado pelos autores.

2 Duo, 4 Gb de RAM, sistema operacional *Windows Vista Home Premium*, utilizando-se a linguagem de modelagem AMPL/CPLEX 11.1 (Fourer et al., 2002) em sua condução. Os custos de transporte e transbordo foram considerados de forma simplificada. Para os custos de transporte, por exemplo, foi feito apenas o cálculo do frete por quilômetro percorrido (R\$/km t). Custos adicionais, como impostos e as possíveis economias de escala geradas pelo transporte de grandes quantidades de carga, foram desconsiderados. E para determinar um custo de transbordo que representasse da forma mais confiável possível os praticados na realidade, os valores foram baseados nos praticados pelas grandes empresas movimentadoras de carga agrícola do Brasil. As capacidades foram consideradas, dentre outras fontes, com base em Anderson et al. (2010).

Por exemplo, os valores considerados para os transbordos rododiferroviários foram de R\$ 2,38/t, enquanto os transbordos rodo-hidroviários foram de R\$ 2,60/t. Em relação ao frete rodoviário, o mais barato foi de R\$ 5,82/km t entre Anápolis-GO e Goiânia-GO e o mais caro foi entre Peixes-TO e Estreito-MA, de R\$ 127,18 /km t, sendo o frete médio de R\$ 32,06/km t. Para o modal ferroviário, a média foi de R\$ 26,03/km t, o maior foi de R\$ 134,60/km t no trecho entre Ceres-GO e Estreito-MA, ao passo que o menor foi de R\$ 1,97/km t, entre e Alto Araguaia-MT e Alto Taquari-MT. O frete hidroviário fluvial médio foi de R\$ 20,44/km t, sendo, o menor, de R\$ 3,15/km t, entre Presidente Epitácio-SP e

Euclides da Cunha Paulista-SP, e o maior, entre Porto Velho-RO e Itacoatiara-AM, de R\$ 53,43/km t.

É importante ressaltar as dificuldades encontradas para definir dados secundários suficientemente confiáveis. Foram visitadas diversas bases de dados, tanto do Governo Federal quanto as disponibilizadas por empresas do setor, agências de notícias e associações ligadas à agroindústria brasileira. Para que os dados encontrados pudessem ser utilizados e os experimentos representassem da forma mais realista possível os fluxos de soja no Brasil, foram necessárias as simplificações apresentadas anteriormente.

3.1. Resultados com a Rede 1

O primeiro experimento realizado com a Rede 1 consiste em variar o valor de p de forma incremental, para o conjunto de possíveis terminais, a fim de se obter o número ótimo de terminais intermodais na rede. Esse tipo de experimento é comumente realizado com modelos baseados no modelo de p -medianas. Como foram desconsiderados os custos de instalação, é possível encontrar o número de terminais instalados que resulta no menor custo total de transporte e transbordo por meio desse experimento. O gráfico da Figura 6 e a Tabela 5 mostram os resultados obtidos, quando se desconsideraram as capacidades nos portos. A solução do modelo indica que $p = 12$. Os terminais instalados podem ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 4. Terminais intermodais acrescidos na Rede 3.

Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações				Terminal Intermodal	Ligações			
	R	F	H	M		R	F	H	M		R	F	H	M
ANA-GO	x	x			EST-MA	x	x	x		STA-PA	x	x	x	x
CER-GO	x	x			JAT-GO	x	x			SOR-MT	x	x		
CUI-MT	x	x			RON-MT	x	x			VDC-PA	x	x	x	x
DOU-MS	x	x			SMP-PA	x	x			VIL-RO	x	x		

Fonte: Elaborado pelos autores.

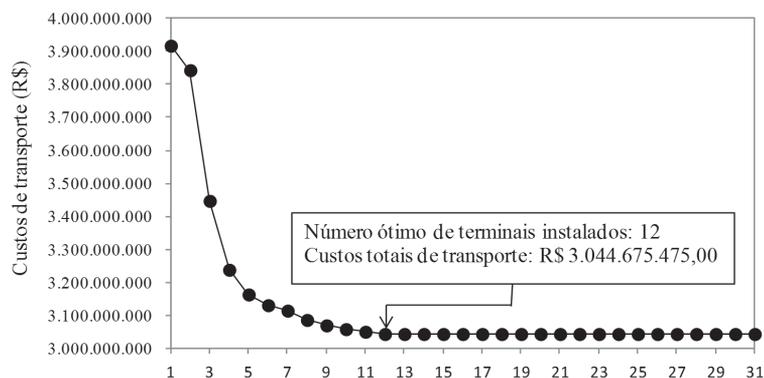


Figura 6. Custos de transporte em função do número de terminais instalados na Rede 1 não capacitada. Fonte: Elaborado pelos autores.

É possível observar no mapa da Figura 7, que mostra os fluxos e os terminais intermodais instalados neste primeiro experimento, que as rodovias são utilizadas apenas quando não há a possibilidade de se utilizar ferrovias ou hidrovias. Sendo assim, é possível concluir que, considerando os volumes de soja que são movimentados com destino à exportação, é mais vantajoso mudar de modal a ter que movimentar a carga pelo restante do trajeto por rodovias, como era esperado. O centroide representado pelo município de Dourados-MS tem acesso à rede apenas por transporte rodoviário. Mas o que se observa é que, assim que é possível ter acesso à rede ferroviária, o modelo opta

por pagar o preço do transbordo rodoferroviário e instalar um terminal intermodal em Maracaju-MS. Por essa razão, é possível prever que, havendo a instalação de um trecho ferroviário entre Maracaju e Dourados, o terminal intermodal instalado seria deslocado para Dourados e não para Maracaju.

Na prática, é sabido que há um importante volume de soja que é transportado para o porto de Santos por meio da hidrovia São Simão-GO – Pederneiras-SP. Conforme o mapa da Figura 7, essa hidrovia não foi utilizada pelo modelo, o que quer dizer que, com os dados utilizados na Rede 1, essa hidrovia não é mais econômica do que a que liga São Simão-GO

Tabela 5. Custos totais em função dos terminais instalados na Rede 1 não capacitada.

p	Custo (R\$)	Terminais Instalados
1	3.916.857.487	PAR-PR (R)
2	3.842.808.172	PAR-PR (R) e SAN-SP (R)
3	3.447.438.959	AAR-MT, PAR-PR (R) e SAN-SP (F)
4	3.239.025.480	AAR-MT, PAR-PR (R), SAN-SP (F) e UBE-MG
5	3.164.289.627	AAR-MT, CGR-MS, PAR-PR (R), SAN-SP (F) e UBE-MG
6	3.131.828.180	AAR-MT, CDS-MS, CGR-MS, PAR-PR (R), SAN-SP (F) e UBE-MG
7	3.115.402.488	AAR-MT, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, PAR-PR (F), SAN-SP (R) e UBE-MG
8	3.087.238.150	AAR-MT, APT-MS, CGR-MS, PAR-PR (R), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
9	3.070.812.457	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CGR-MS, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
10	3.059.413.163	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
11	3.051.470.877	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, MAC-MS, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
12	3.044.675.475	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, GOI-GO, MAC-MS, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG

Fonte: Elaborado pelos autores.

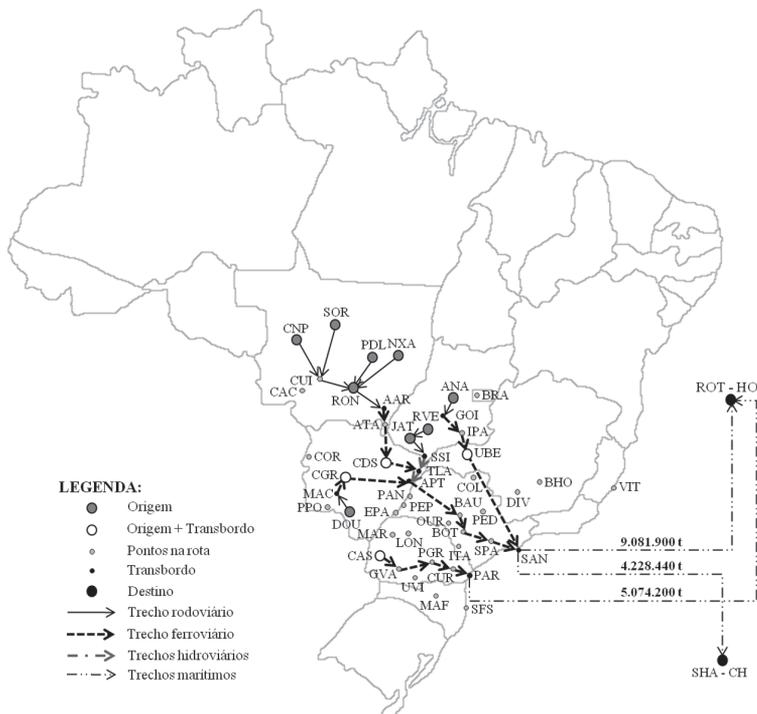


Figura 7. Fluxos de soja da Rede 1 não capacitada. Fonte: Elaborado pelos autores.

a Três Lagoas-MT, passando por Aparecida do Taboado-MT. É possível que a explicação para isso esteja no modo como os custos de transporte foram considerados nesse estudo. Na Figura 7, também é possível observar as quantidades, em toneladas, da soja que é escoada pelos dois portos utilizados: o porto de Santos e o porto de Paranaguá. Segundo dados publicados por Anderson et al. (2010), o porto de Santos tem capacidade de movimentação de soja de aproximadamente 7,1 milhões de toneladas por ano. O modelo apresentou um fluxo de mais de 13 milhões de toneladas sendo escoado por esse porto, o que seria impossível na prática em função da sua capacidade. Com base nessa informação, em um segundo experimento com a Rede 1, foram inseridas as restrições de capacidade dos portos de Santos e Paranaguá. Muitas mudanças podem ser observadas quando são incorporadas ao modelo as restrições de capacidade dos portos. A primeira e mais imediata, quando se observa o mapa da Figura 8, é a instalação do terminal intermodal no porto de Vitória-ES.

Também foram identificadas importantes alterações no comportamento dos fluxos de soja. Em virtude da restrição de capacidade do porto de Santos, parte da soja produzida dos estados do Mato Grosso e do Mato Grosso do Sul passa a ser escoada pelo porto de Paranaguá, até atingir a capacidade deste porto.

Os terminais intermodais instalados em Euclides da Cunha Paulista-SP e em Maringá-PR permitem que a soja chegue até o porto de Paranaguá. A soja que é escoada pelo porto de Vitória é parte da que é produzida pelo Estado de Goiás. A carga vai até Uberlândia-MG, de onde parte é enviada via ferrovia diretamente ao porto de Santos e o excedente é enviado para o porto de Vitória. Neste experimento, os portos de Santos e Paranaguá atingem sua capacidade máxima e o porto de Vitória escoo o excedente, o que corresponde a aproximadamente 14% da capacidade deste terminal. Resultados que mostram os portos de Santos e Paranaguá nos limites de suas capacidades condizem com o que acontece na prática (Brito, 2010). O gráfico da Figura 9 e a Tabela 6 mostram que, além do terminal do porto de Vitória, outros 3 terminais intermodais foram instalados, totalizando 16.

3.2. Resultados com a Rede 2

Quando são incorporados os estados das regiões Norte e Nordeste do país na Rede 2, os fluxos de soja, sem restrições de capacidade nos portos, se apresentam como na Figura 10. São utilizados para embarque da soja os portos de Santos-SP, Paranaguá-PR, Itacoatiara-AM, Santarém-PA e Itaqui-MA, que

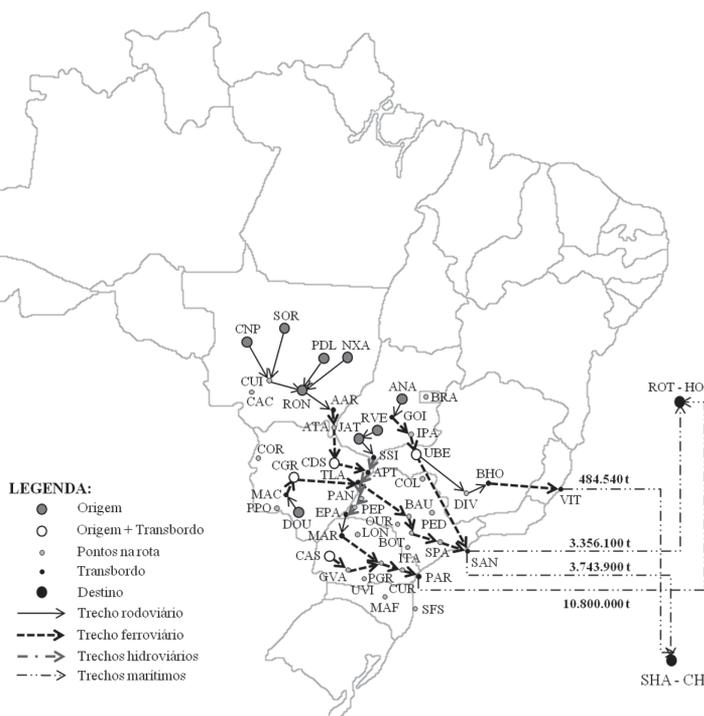


Figura 8. Fluxos de soja da Rede 1 capacitada nos portos. Fonte: Elaborado pelos autores.

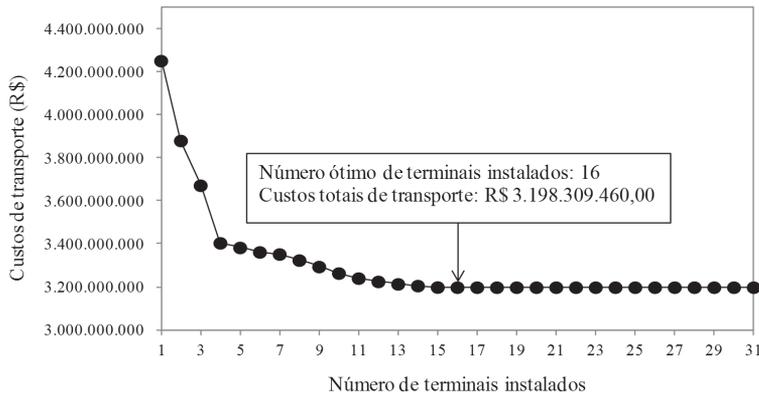


Figura 9. Custos de transporte em função do número de terminais intermodais instalados na Rede 1 capacitada nos portos. Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 6. Custos totais em função dos terminais instalados na Rede 1 capacitada nos portos.

p	Custo (R\$)	Terminais Instalados
1	4.252.515.065	SFS-SC(R)
2	3.880.809.025	PAR-PR (R) e VIT-ES (R)
3	3.672.577.835	AAR-MT, SAN-SP (F) e SFS-SC (R)
4	3.404.567.309	AAR-MT, PAR-PR (R), SAN-SP (F) e VIT-ES (R)
5	3.383.112.493	AAR-MT, BHO-MG, PAR-PR (R), SAN-SP (F) e VIT-ES (F)
6	3.362.309.691	AAR-MT, PAR-PR (R), PEP-SP, SAN-SP (F), SSI-GO e VIT-ES (R)
7	3.352.594.052	AAR-MT, BHO-MG, PAR-PR (R), PEP-SP, SAN-SP (F), SSI-GO e VIT-ES (F)
8	3.324.393.796	AAR-MT, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (R), PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO e VIT-ES (R)
9	3.294.276.609	AAR-MT, CAS-PR, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (F), PEP-SP, SAN-SP (F), SSI-GO e VIT-ES (R)
10	3.263.899.528	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CGR-MS, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO e VIT-ES (R)
11	3.240.499.376	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CGR-MS, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS e VIT-ES (R)
12	3.225.017.666	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CGR-MS, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SFS-SC (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
13	3.213.618.371	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, EPA-SP, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SFS-SC (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
14	3.205.680.164	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, EPA-SP, MAC-MS, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SFS-SC (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
15	3.198.881.585	AAR-MT, APT-MS, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, EPA-SP, GOI-GO, MAC-MS, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SFS-SC (F), SSI-GO, TLA-MS e UBE-MG
16	3.198.309.460	AAR-MT, APT-MS, BHO-MG, CAS-PR, CDS-MS, CGR-MS, EPA-SP, GOI-GO, MAC-MS, MAR-PR, PAR-PR (F), SAN-SP (F), SSI-GO, TLA-MS, UBE-MG e VIT-ES (F)

Fonte: Elaborado pelos autores.

estão entre os 22 terminais intermodais instalados para escoar toda a produção de soja. O porto de Itaquí fica responsável pelo escoamento da soja que é produzida nos estados do Maranhão e Bahia, que foi incluída na Rede 2, e por parte da soja produzida no norte do Mato Grosso. Os portos de Santarém e Itacoatiara também passaram a movimentar a soja do norte do Estado do Mato Grosso, fazendo uso das hidrovias disponíveis. O porto de Vila do Conde-PA, segundo informações da CDP (Companhia de Docas do Pará), ainda não movimenta grãos (Companhia de Docas do Pará, 2010). Como há projetos para que isso passe a acontecer nos próximos anos, o porto de Vila do Conde será analisado como um cenário futuro na Rede 3.

As rotas das regiões Sudeste e Sul da Rede 1 continuaram as mesmas na Rede 2. Apenas as quantidades movimentadas é que foram reduzidas, em virtude da divisão da produção do norte do Mato Grosso entre os portos citados. As ferrovias continuam sendo utilizadas mais que as rodovias, ainda que seja necessário se pagar pelo transbordo da carga. Na região Norte, predomina o transporte por hidrovias, como pode ser observado com a utilização das hidrovias do rio Madeira, do rio Teles Pires e do rio Araguaia.

Analisando as quantidades embarcadas em cada um dos portos, foi possível identificar uma utilização acima da capacidade no porto de Santarém. Considerando que a capacidade de movimentação deste terminal é em torno de 1,1 milhões de toneladas por ano, o

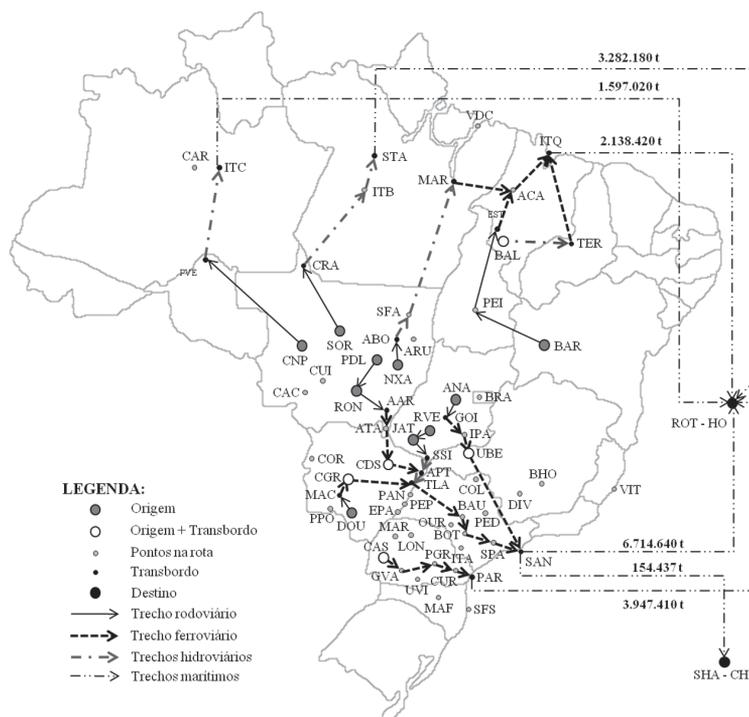


Figura 10. Fluxos de soja da Rede 2 não capacitada. Fonte: Elaborado pelos autores.

porto de Santarém estaria movimentando, segundo o experimento, quase o triplo do que suportaria. Partindo desta análise, foram sendo incorporadas outras restrições de capacidade de embarque nos portos e novos experimentos foram feitos. O que se observou foi que restringir apenas as capacidades dos portos de Santos, Santarém e Itaquí foi suficiente para que as restrições de embarque nos terminais dos portos disponíveis fossem obedecidas.

Depois de uma série de experimentos com a Rede 2 semelhantes aos anteriores, com limites de capacidade impostos para os portos de Santos, Santarém e Itaquí, os fluxos de soja da Rede 2 passaram a se comportar como no mapa da Figura 11. Para escoar toda a soja, foi necessário instalar mais dois terminais: Euclides da Cunha Paulista-SP e Maringá-PR, fazendo com que a soja passasse a ser largamente escoada pelo porto de Paranaguá, o que pode ser verificado na prática.

O porto de Vila do Conde, no norte do Estado do Pará, ainda não movimenta grãos. No entanto, em vários estudos da ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários, 2009) e do Governo Federal, por meio do PAC, o porto de Vila do Conde é citado como alvo de futuros investimentos. Segundo o Governo, o Porto deverá ter capacidade de movimentação de 2,5 milhões de toneladas de grãos por ano em apenas 5 anos (Programa para Aceleração do Crescimento, 2009). Com base nessa informação, foi feito um

experimento para verificar esse impacto nos fluxos de soja da Rede 2. Como mostra o mapa da Figura 12, são utilizados, assim como no experimento anterior, 24 terminais intermodais para escoar a soja produzida nesse cenário. Isso porque, como é possível observar, o terminal hidroferroviário de Marabá-PA é substituído pelo terminal do porto de Vila do Conde-PA.

Com a instalação do terminal de grãos no porto de Vila do Conde, o porto de Itaquí passa a operar em aproximadamente 70% de sua capacidade. O porto de Paranaguá, que tinha sido responsável pelo escoamento do excedente de produção após as restrições de capacidade dos portos de Santos, Santarém e Itaquí, tem o volume escoado por suas instalações reduzido em quase 17%. O porto de Vila do Conde passa então a escoar toda a soja produzida nas regiões de Nova Xavantina, no Mato Grosso, e de Anápolis, em Goiás. Esses 17% do volume de soja que deixaram de ser escoados pelo porto de Paranaguá são equivalentes a, aproximadamente, 1 milhão de toneladas de soja. Em termos práticos, trata-se de 1 milhão de toneladas de soja escoado por uma opção mais cara, por falta de alternativas mais econômicas. Observando o valor da função objetivo, a inclusão do terminal de grão no porto de Vila do Conde contribuiu para uma redução de 2%, o que é equivalente a mais de 60 milhões de reais.

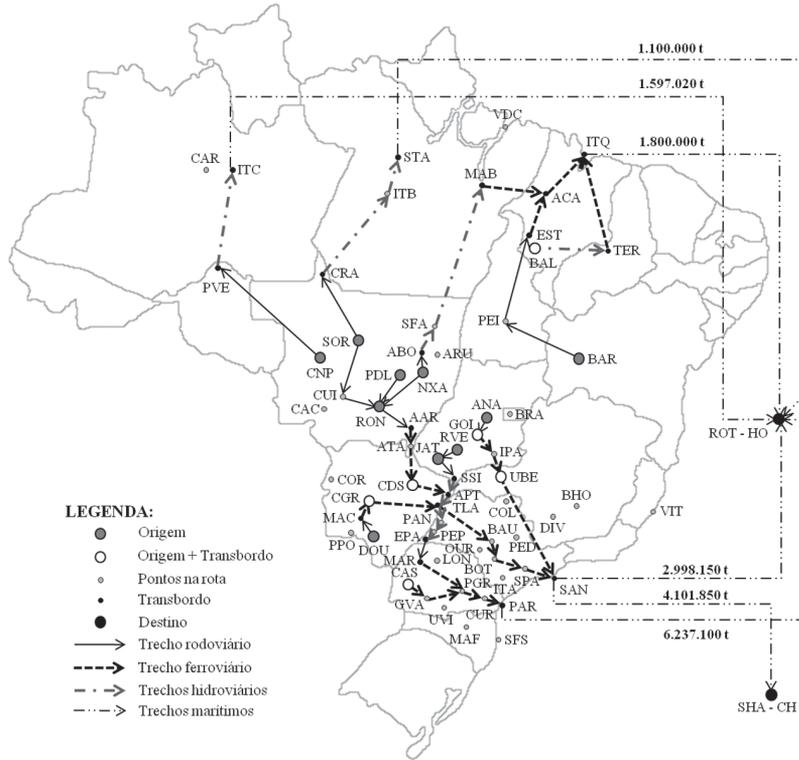


Figura 11. Fluxos da Rede 2 capacitada nos portos. Fonte: Elaborado pelos autores.

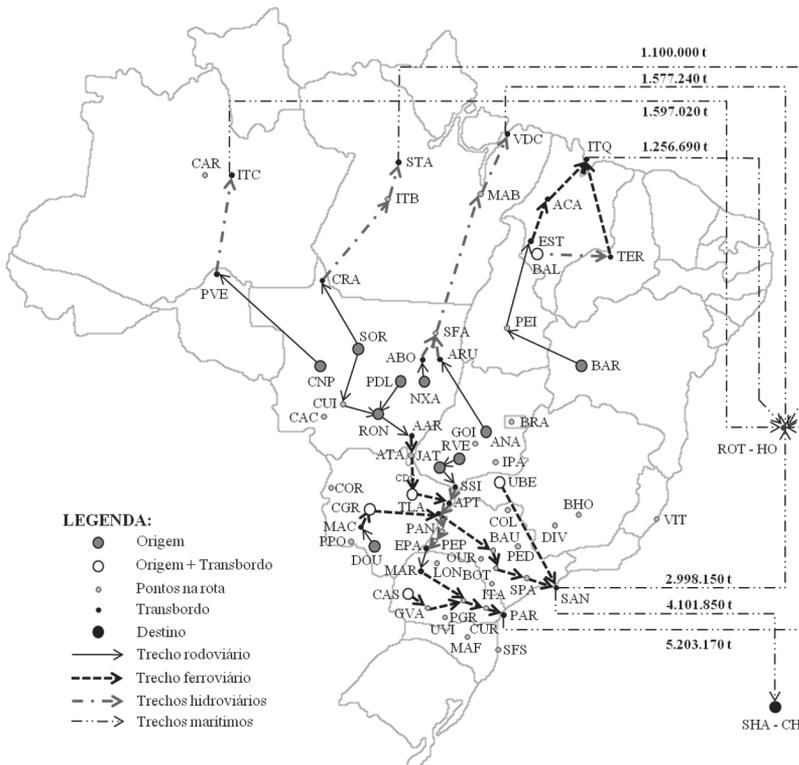


Figura 12. Fluxos de soja da Rede 2 + terminal de grãos do porto de Vila do Conde. Fonte: Elaborado pelos autores.

O porto de Itaqui, com sua capacidade em torno de 2 milhões de toneladas, movimenta, segundo informação da EMAP (Empresa Maranhense de Administração Portuária), disponível em Brito (2010), o equivalente a aproximadamente 34% da produção total de sua área de influência. O projeto do Tegram (Terminal de Grãos do Maranhão) prevê o aumento da capacidade do porto de Itaqui para 7 milhões de toneladas. Com base nos resultados obtidos, é possível perceber que o aumento da capacidade do porto de Itaqui já seria suficiente para escoar a produção. Neste caso, uma possível análise a ser feita seria a comparação entre expandir a capacidade do porto de Itaqui ou instalar um terminal no porto de Vila do Conde, segundo critérios que não a capacidade necessária para escoar o volume produzido, visto que, segundo o modelo, qualquer uma das alternativas atenderia a essa questão.

Por meio desses experimentos, foi possível ilustrar algumas análises que podem ser feitas com a utilização do modelo matemático proposto para apoiar decisões de fluxo e localização de terminais em situações práticas. Uma vez inserida uma nova possibilidade para o escoamento da soja, os resultados foram consistentes e mostraram o impacto no comportamento dos fluxos de soja na rede, bem como nos custos variáveis totais.

3.3. Resultados com a Rede 3

A Figura 13 mostra o comportamento dos fluxos para a Rede 3 não capacitada. Alguns trechos das novas ferrovias foram utilizados em detrimento de rodovias: Vilhena-RO a Porto Velho-RO, Sorriso-MT a Santarém-PA, Dourados-MS a Cascavel-PR e Rondonópolis-MT a Alto Araguaia-MT. Para escoar a soja, foi necessária a instalação de $p = 22$ terminais intermodais. As Redes 2 e 3, ambas sem restrições de capacidade, apresentam custos mínimos com a instalação de 22 terminais. No entanto, quando são comparados os valores das funções objetivo de cada experimento, é possível verificar uma redução de 4% no valor do custo para a Rede 3 em relação à Rede 2. Considerando que a movimentação de soja no Brasil é de bilhões de reais todos os anos, uma redução de 4% pode representar uma economia expressiva nos custos logísticos totais.

Com base neste resultado, podem ser feitas algumas análises adicionais. Uma delas é verificar quanto é possível se reduzir do custo do escoamento da soja quando são realizadas mudanças infraestruturais da rede. Tendo conhecimento dos custos fixos de instalação dos terminais intermodais e de outras questões relevantes, esse tipo de análise pode auxiliar na tomada de decisão. O impacto de decisões infraestruturais no custo variável da operação pode

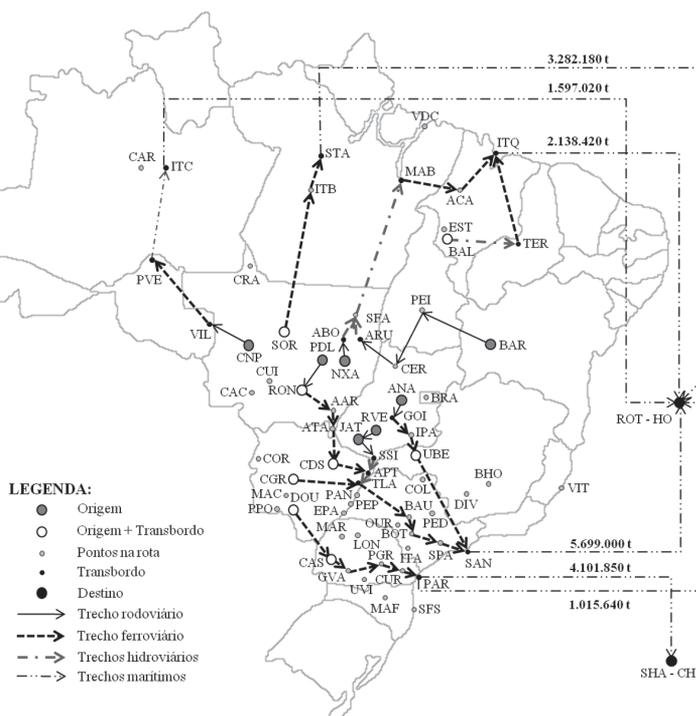


Figura 13. Fluxos de soja da Rede 3 não capacitada. Fonte: Elaborado pelos autores.

ser decisivo ao término da avaliação. A inclusão de restrições de capacidade nos portos de Santos, Santarém, Itaquí e Itacoatiara provoca algumas mudanças no fluxo de soja, que estão no mapa da Figura 14. A percepção mais imediata é a da utilização de mais dois trechos ferroviários que não haviam sido utilizados: Sorriso-MT a Cuiabá-MT e Cuiabá-MT a Rondonópolis-MT. Com as restrições de capacidade impostas na rede, os fluxos são redirecionados da forma mais econômica possível.

4. Considerações finais

A soja é um dos principais produtos exportados pelo Brasil. Dos grãos produzidos, a soja corresponde a quase metade do volume total. Ao longo dos anos, com a interiorização das lavouras e seu crescimento nas exportações, várias das fragilidades infraestruturais do sistema de transporte de cargas foram expostas. Não só a precariedade das vias de acesso aos portos, como também da infraestrutura de apoio, tais como armazéns e terminais intermodais. A infraestrutura insuficiente e as grandes distâncias a serem percorridas do interior para o litoral colocaram produtores e movimentadores de carga diante de um grande desafio logístico. Neste cenário, os principais atores envolvidos apostam no investimento em transporte

intermodal como uma solução promissora (Ojima, 2007). O transporte intermodal é promissor na movimentação de grandes volumes de produtos por longas distâncias de maneira mais econômica, visto que aproveita o melhor de cada um dos modais de transporte disponíveis (Chang, 2008).

Cada vez mais, é possível se observar o crescimento da atenção dada à logística de escoamento de produtos agroindustriais destinados à exportação. Jornais de grande circulação nacional, sites especializados, dentre outros veículos de comunicação e informação, têm mostrado, de um lado, o potencial mal explorado do Brasil na exportação de produtos agroindustriais e na infraestrutura logística e, de outro, a preocupação do Governo, das empresas envolvidas, das agências financiadoras de projetos e de grupos de pesquisa nas universidades, em promover melhorias neste sentido. Tem-se observado também por parte desses agentes, um forte incentivo à utilização da intermodalidade no escoamento de produtos agroindustriais (Brito, 2010; Programa para Aceleração do Crescimento, 2009).

Uma contribuição deste trabalho foi evidenciar o potencial de análise de uma abordagem de otimização para apoiar decisões de fluxo de soja e localização de terminais intermodais em situações práticas. Diversas análises foram realizadas com o objetivo de verificar o potencial da formulação de programação matemática

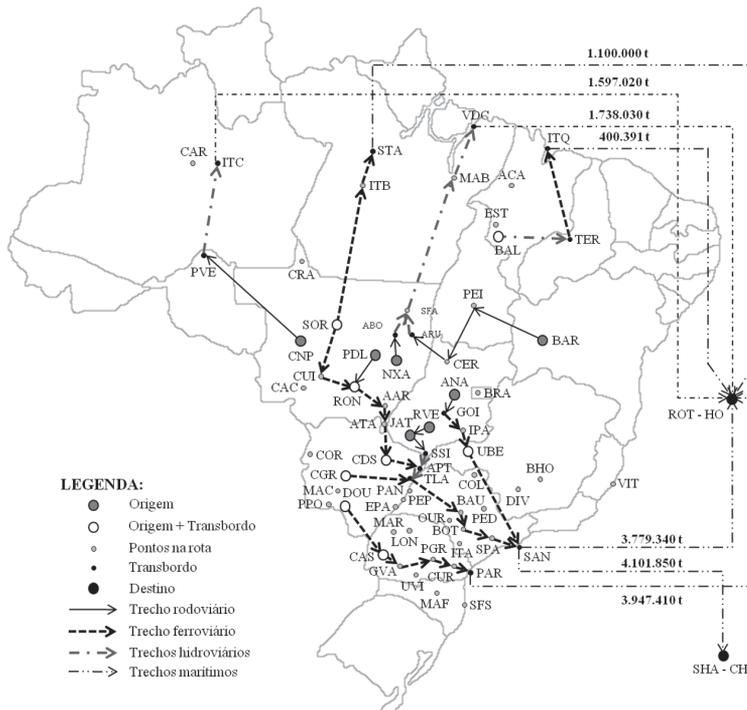


Figura 14. Fluxos de soja da Rede 3 capacitada. Fonte: Elaborado pelos autores.

proposta em Amaral et al. (2012) para auxiliar a tomada de decisões em cenários mais complexos e realistas, como a rede de escoamento da soja brasileira destinada à exportação. Em algumas situações, foram feitas modificações na própria estrutura da rede, com o objetivo de verificar os impactos tanto nos custos variáveis totais quanto nos fluxos de grãos e nos locais indicados para a instalação dos terminais intermodais.

Com os experimentos, puderam ser identificadas algumas oportunidades de aprofundamento e continuidade no tema. Por exemplo, o estudo se restringiu aos fluxos de soja em grão destinada à exportação, o que equivale a aproximadamente 40% do volume total produzido. Os outros 60% da soja são destinados ao mercado interno na forma de grão, ou são processados para serem tanto exportados quando consumidos internamente na forma de óleo e farelo de soja. Visto que esse volume também compete pela capacidade de vias, armazéns e terminais intermodais ao longo do país, esse tema poderia ser considerado em uma pesquisa futura. Outra sugestão seria estender o modelo para considerar incertezas, como as relativas aos custos e capacidades de movimentação, com a utilização de técnicas de programação estocástica e otimização robusta.

Em relação aos custos fixos de instalação de terminais intermodais que foram desconsiderados, para pesquisa futura, seria interessante incorporar tais custos, para que análises mais amplas e genéricas possam ser feitas. Também seria interessante considerar outros custos além do frete na composição dos custos variáveis, como custos de estoque em trânsito, custos associados a impostos, custos de perda, etc. Os custos variáveis de transporte e transbordo foram considerados de forma linear, isto é, crescem na medida em que o volume de soja aumenta. Para se aproximar ainda mais da realidade, seria interessante estender a análise para considerar custos côncavos, ou côncavos lineares por partes, permitindo, assim, considerar as eventuais economias de escala geradas com o aumento do volume da carga movimentada.

Referências

Agência Nacional de Transportes Aquaviários. (2009). *Portos*. Brasília. Recuperado em 12 de maio de 2009, de <http://www.antaq.gov.br/Portal/pdf/Portos>

Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2012). *Transporte multimodal*. Brasília. Recuperado em 20 de fevereiro de 2012, de <http://www.antt.gov.br/relatorios/ferroviario/concessionarias2007/index.asp>

Amaral, D. (2003). *A construção do Brasil novo* (1. ed.). Brasília: Senado Federal.

Amaral, M., Almeida, M. S., & Morabito, R. (2012). Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para

escoamento da soja brasileira destinada à exportação. *Gestão & Produção*, 19(2), 717-732. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2012000400005>.

- Anderson, V. L., Stupello, B., Leal, M. B. S., Cardoso, J. F. L., & Pinto, M. M. O. (2010). *Avaliação da capacidade dos terminais de grãos agrícolas utilizados para escoamento da produção do Centro-Oeste brasileiro*. Centro de Estudos em Gestão Naval. Recuperado em 10 de fevereiro de 2010, de <http://www.gestaonaval.org.br>
- Arnold, P., Peeters, D., & Thomas, I. (2004). Modeling a rail/road intermodal transportation system. *Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review*, 40(3), 255-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2003.08.005>.
- Arnold, P., Peeters, D., Thomas, I., & Marchand, H. (2001). Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation at extensions. *The Canadian Geographer*, 45(3), 427-436. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1541-0064.2001.tb01192.x>.
- Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. (2012). *Importância econômica e social*. São Paulo. Recuperado em 5 de maio de 2012, de <http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=importancia-economica-e-social&area=NC0yLTI=>.
- Brito, A. (2010, February 7). Apagão logístico impede o avanço do agronegócio. *Folha de São Paulo*, Dinheiro.
- Bulhões, R., & Caixeta Filho, J. V. (2000). Análise da distribuição logística da soja na região Centro-Sul do Brasil através de um modelo de equilíbrio espacial. *Teoria e Evidência Econômica*, 8(15), 11-23.
- Chang, T. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. *Computers & Operations Research*, 35(9), 2877-2891. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.025>.
- Companhia de Docas do Pará. (2010). *O porto de Vila do Conde*. Recuperado em 10 de fevereiro de 2010, de <http://www.cdp.com.br/porto.php?nldPorto=6>
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2012). *Soja*. Brasília. Recuperado em 14 de abril de 2012, de http://www.embrapa.br/index.php?op_page=22&cod_pai=16
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). Recuperado em 23 de maio de 2009, de <http://www.fao.org/>.
- Fourer, R., Gay, D. M., & Kernighan, B. W. (2002). *AMPL: a modeling language for mathematical programming*. Tree Lakes: Cole Publishing Company.
- Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes. (2009). *Análise de rotas alternativas para escoamento da produção de soja*. Recuperado em 3 de janeiro de 2009, de http://www.geipot.gov.br/estudos_realizados/soja/index.htm
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2009). *Banco de dados agregados*. Recuperado em 3 de abril de 2009, de <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1612&z=p&o=22>
- Instituto de Economia Agrícola. (2010). *Quem somos*. Recuperado em 5 de abril de 2010, de <http://www.iea.sp.gov.br/out/instituto.html>
- Lopes, R. L., & Caixeta Filho, J. V. (2000). Suinocultura no estado de Goiás: aplicação de um modelo de localização. *Pesquisa Operacional*, 20(2), 213-232. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-7438200000200006>.
- Ojima, A. L. R. O. (2007). Transporte de soja do Estado do Mato Grosso para exportação: uma aplicação de programação linear. *Revista de Economia Agrícola*, 54, 33-41.
- Oliveira, A. M. K., & Caixeta Filho, J. V. (2007). Potencial da logística ferroviária para movimentação de açúcar para

exportação no Estado de São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 45(4), 823-853. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-20032007000400002>.

Programa para Aceleração do Crescimento. (2009). *Infraestrutura Norte*. Recuperado em 23 de maio de 2009, de http://www.brasil.gov.br/pac/infra_estrutura/norte.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos dois revisores anônimos os úteis comentários e sugestões de revisão no artigo, e também à CAPES, CNPq, FAPESP e FINEP o apoio a esta pesquisa.

A study of the locations of intermodal terminals in the brazilian network for soybean exports

Abstract

Soybean is one of the most important Brazilian agricultural products. Of the entire volume of soybean produced in Brazil, approximately 40% is for export. As soybean crops are mainly concentrated in the center of the country, the soybeans generally must travel large distances to reach the seaports. In this case, intermodal transport can enable the movement of large volumes over long distances in a more efficient and economic manner. In this study, we analyze the application of a mathematical programming model to support decisions on the soybean flows and the locations of intermodal terminals. Based on secondary data, three alternative networks are proposed, with different coverage areas and the possibility of using railroads in construction or the design phase. The primary soybean producing states and traders were considered. Experiments with the model resulted in identification of the transport flows and the location of terminals consistent with reality. Alternative scenarios for the network were also analyzed, showing the potential of this analysis optimization tool.

Keywords

Network for soybean exports. Mixed integer linear programming. Facility location problem. Network flows. Intermodal terminals.

Apêndice A. Modelo de fluxos e localização de terminais intermodais.

Para mais detalhes deste modelo, o leitor pode consultar Amaral et al. (2012).

Cada rede modal (rodoviária, ferroviária, hidroviária e marítima) é representada por um grafo orientado $G(V_m, A_m)$, sendo $m = 1, 2, 3, 4$ e, V_m e A_m os conjuntos de nós e arcos das redes rodoviária, ferroviária, hidroviária e marítima. São definidos os seguintes conjuntos:

$$A = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A' \cup T$$

$$V = V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_4 \cup O \cup D$$

em que:

$$A' = A'_{O1} \cup A'_{4D}$$

$$T = T_{12} \cup T_{21} \cup T_{13} \cup T_{31} \cup T_{23} \cup T_{32} \cup T_{14} \cup T_{24} \cup T_{34}$$

$$W = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup T$$

sendo O e D os conjuntos dos nós de origem e destino, A' o conjunto formado pelo conjunto dos arcos que ligam os nós de origem a nós da rede rodoviária (A'_{O1}) e pelo conjunto dos arcos que ligam os nós da rede marítima aos nós de destino (A'_{4D}), T o conjunto dos arcos de transbordo entre os diversos modais 1, 2, 3 e 4 e W é o conjunto de arcos de transporte. Os parâmetros, variáveis e a formulação do modelo são:

Parâmetros do modelo:

c_{ij} = custo unitário do arco $(i, j) \in A$, sendo ele de transporte ou transbordo

d_{ij} = custo fixo de instalação de um terminal intermodal no arco $(i, j) \in T$

p = número de terminais intermodais a serem instalados

a_i = quantidade ofertada na origem $i \in O$

b_j = quantidade demandada no destino $j \in D$

u_{ij} = capacidade do terminal intermodal instalado no arco $(i, j) \in T$

Variáveis do modelo:

x_{ij} = fluxo de soja no arco $(i, j) \in A$

y_{ij} = variável binária que indica a instalação ou não do terminal intermodal no arco $(i, j) \in T$

Formulação matemática:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{(i,j) \in T} y_{ij} = p \quad (2)$$

$$\sum_{j|(i,j) \in A'_{O1}} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in O \quad (3)$$

$$\sum_{i|(i,k) \in W} x_{ik} = \sum_{j|(k,j) \in W} x_{kj} \quad \forall k \in V \setminus \{O \cup D\} \quad (4)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A'_{4D}} x_{ij} = b_j \quad \forall j \in D \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} y_{ij} \quad \forall (i,j) \in T \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (7)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in T \quad (8)$$

A função objetivo (1) minimiza os custos variáveis de transporte na rede e de transbordo nos terminais intermodais. A restrição em (2) garante que exatamente p terminais sejam instalados. As restrições (3) referem-se às limitações das quantidades de soja dos nós de oferta da rede, determinando que as quantidades escoadas a partir dos centroides não excedam às suas produções individuais. As restrições (4) referem-se à conservação de fluxo nos nós intermediários da rede, que são formados pelos arcos de transporte e pelos terminais intermodais. As restrições em (5) referem-se ao atendimento nos nós de demanda da rede e garantem que as quantidades de soja demandadas nos destinos internacionais sejam atendidas. Em (6), garante-se que só pode haver fluxo em um terminal intermodal se este for aberto e que as limitações de capacidade de transbordo sejam respeitadas. Finalmente, em (7) e (8) são definidos os domínios das variáveis, sendo as variáveis de fluxo não negativas e as de abertura de terminais intermodais, binárias.

Apêndice B. Tabela das siglas dos municípios representados nas Redes 1, 2 e 3.

AAR	Alto Araguaia	JAT	Jataí
ABO	Água Boa	LON	Londrina
AÇA	Açailândia	MAB	Marabá
ANA	Anápolis	MAC	Maracaju
APT	Aparecida do Taboado	MAF	Mafra
ARU	Aruanã	MAR	Maringá
ATA	Alto Taquari	NXA	Nova Xavantina
BAL	Balsas	OUR	Ourinhos
BAR	Barreiras	PAN	Panorama
BAU	Bauru	PAR	Paranaguá
BHO	Belo Horizonte	PDL	Primavera do Leste
BOT	Botucatu	PED	Pederneiras
BRA	Brasília	PEI	Peixes
CAC	Cáceres	PEP	Presidente Epitácio
CAR	Careiro	PGR	Ponta Grossa
CAS	Cascavel	PPO	Ponta Porã
CDS	Chapadão do Sul	PVE	Porto Velho
CER	Ceres	RON	Rondonópolis
CGR	Campo Grande	ROT	Rotterdam
CNP	Campo Novo do Parecis	RVE	Rio Verde
COL	Colônia	SAN	Santos
COR	Corumbá	SFA	São Félix do Araguaia
CRA	Cachoeira Rasteira	SFS	São Francisco do Sul
CUI	Cuiabá	SHA	Shangai
CUR	Curitiba	SMP	Santa Maria do Pará
DIV	Divinópolis	SOR	Sorriso
DOU	Dourados	SPA	São Paulo
EPA	Euclides da Cunha Paulista	SSI	São Simão
EST	Estreito	STA	Santarém
GOI	Goiânia	TER	Teresina
GVA	Guarapuava	TLA	Três Lagoas
IPA	Ipameri	UBE	Uberlândia
ITA	Itapeva	UVI	União da Vitória
ITB	Itaituba	VDC	Vila do Conde
ITC	Itacoatiara	VIL	Vilhena
ITG	Itaguaí	VIT	Vitória
ITQ	Itaquí		