

UM MODELO DE PLANEJAMENTO OPERACIONAL PARA A CADEIA AGROINDUSTRIAL DA SOJA NO BRASIL

Mônica do Amaral

Reinaldo Morabito

Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luís, km 235, Monjolinho, São Carlos – SP, CEP: 13.565-905
monica@dep.ufscar.br, morabito@ufscar.br

Maurício Cardoso de Souza

Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Presidente Antônio Carlos, 6627, Pampulha, Belo Horizonte – MG, CEP: 31.270-010
mauricio.souza@pq.cnpq.br

RESUMO

Decisões operacionais no planejamento de transportes, industrialização e armazenagem no complexo da soja são de grande importância para as empresas que atuam no setor no Brasil. O transporte ocorre em uma rede intermodal, caracterizando-se pela transposição de grandes distâncias entre as áreas de produção agrícola e os principais portos ou mercados consumidores. Nas indústrias esmagadoras, a soja em grão gera simultaneamente farelo e óleo bruto, que pode ser posteriormente refinado. A manutenção de estoques desses produtos pode ocorrer em silos, tanques e armazéns gerais, localizados nas indústrias e nos terminais intermodais. Apresenta-se uma formulação de programação inteira mista para o problema, com o objetivo de minimização dos custos de transporte e transbordo, industrialização, armazenagem e não atendimento da demanda, considerando economias de escala nos transportes ferroviário e hidroviário. Testes preliminares realizados com instâncias baseadas em dados secundários servem para verificar a coerência e ilustrar o potencial de análise do modelo.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento operacional. Complexo da soja. Cadeias de suprimento agroindustriais. PO na Logística e Transportes.

ABSTRACT

Operational decisions in the planning of transport, processing and storage in the soy complex are very important for companies operating in this sector in Brazil. The transport takes place in an intermodal network, characterized by transposition of long distances between areas of agricultural production and main ports or consumer markets. In overwhelming industries, soybean is simultaneously converted in soy meal and raw oil, which can be further refined. Inventories of these products can occur in silos, tanks and general warehouses, e chain, located in industries and intermodal terminals. We present a mixed integer programming formulation to this problem, with the objective of minimizing the costs of transport and transshipment, processing, storage and stock out, considering economies of scale in transport by rail and waterway. Preliminary tests with instances based on secondary data are used to check consistency and to illustrate the potential model analysis.

KEY WORDS. Operational planning. Soy complex. Agribusiness supply chains. OR in Logistics and Transportation.

1. Introdução

O complexo agroindustrial da soja é formado pelo grão, pelo farelo e pelos óleos bruto e refinado. O grão é destinado principalmente para a exportação direta e a indústria de esmagamento, sendo o consumo interno do produto *in natura* pouco expressivo. Após ser esmagado, o grão gera farelo de soja e óleo bruto, que atendem tanto ao consumo interno quanto aos mercados internacionais. O farelo é utilizado como fonte de proteínas em indústrias de rações para consumo animal. O óleo bruto pode ser exportado, usado para a produção de biodiesel ou ainda ser refinado e utilizado como matéria-prima na indústria alimentícia, servindo de base para a produção de óleos comestíveis, margarinas, maionese e sorvetes, dentre outros produtos.

A coordenação das diversas atividades compreendidas entre a colheita da soja e a sua destinação final, tanto nos casos da exportação direta ou da sua transformação em produtos derivados, geralmente é realizada por grandes empresas do setor agroindustrial. Muitas dessas empresas são detentoras de vários elos ao longo da cadeia, possuindo estruturas administrativas verticalizadas, que controlam as indústrias esmagadoras e de refino, além de armazéns, terminais intermodais e de exportação (BUNGE, 2010; CARAMURU, 2010; CARGILL, 2010; LOUIS DREYFUS, 2010). Nesses casos, o planejamento de curto prazo pode se tornar bastante complicado, principalmente pela necessidade de coordenação simultânea das atividades de transporte, industrialização e armazenagem de todos os produtos na rede física disponível.

No Brasil, vários fatores contribuem para a importância e para complexidade de gestão do setor. De um lado, a soja apresenta grande importância econômica, movimentando US\$ 17,24 milhões somente em exportações em 2009 (ABIOVE, 2010). Na posição de segundo maior produtor mundial, concentra na possibilidade de expansão das áreas de cultivo grande vantagem competitiva em relação aos seus concorrentes diretos, os EUA e a Argentina (USDA, 2008). Por outro, o amplo cultivo da soja, ocupando atualmente cerca de 40% das áreas agriculturáveis e se distribuindo por todas as regiões do país (MENDES e PADILHA JÚNIOR, 2008), também impõe sérias dificuldades. Dentre elas, destacam-se principalmente os elevados custos de transportes causados pelas grandes distâncias a serem percorridas em um sistema intermodal ineficiente (OJIMA, 2006). No período de safra, também ocorrem problemas de congestionamento nos principais portos, devido à carência de armazéns que possam absorver a grande produção (KUSSANO e BATALHA, 2009) que se concentra nos meses de março e abril.

No presente trabalho, tem-se por objetivo apresentar um modelo de planejamento operacional para a cadeia agroindustrial da soja no contexto brasileiro. O trabalho está organizado, a partir dessa introdução, da seguinte forma: na seção 2, apresenta-se uma breve revisão da literatura, destacando-se alguns trabalhos relacionados à modelagem de problemas de processamento, transporte e armazenagem em cadeias agroindustriais. Na seção 3, o problema de planejamento operacional da produção, armazenagem e transporte no complexo da soja é apresentado e formulado matematicamente. A seguir, na seção 4, apresentam-se alguns testes preliminares, realizados com instâncias baseadas em dados secundários. Finalmente, na seção 5, encerra-se o trabalho com algumas considerações a respeito da aplicabilidade do modelo, além de perspectivas em andamento e de trabalhos futuros.

2. Revisão de Literatura

Uma cadeia de suprimentos agroindustrial engloba atividades de planejamento da produção, distribuição, processamento e *marketing* de produtos de origem agrícola, desde a plantação até o consumidor final. Algumas características específicas da agroindústria, como qualidade e segurança alimentar ou variabilidades sazonais na produção, no preço e na demanda, contribuem para o aumento de complexidade da cadeia e resultam em dificuldades adicionais de gerenciamento (AHUMADA e VILLALOBOS, 2009).

Dentre os trabalhos publicados na área, encontram-se aplicações a uma grande diversidade de produtos, classificados basicamente como perecíveis e não perecíveis. Em relação

ao foco do decisor sobre a cadeia, o objetivo do trabalho pode estar voltado a diferentes horizontes de planejamento e a diferentes sistemas, podendo inclusive cobrir apenas alguns elos específicos. Informações adicionais sobre o tema podem ser encontradas em Lowe e Preckel (2004), que fazem uma revisão de problemas relativos à plantação, colheita e risco por parte do produtor. Mais recentemente, Ahumada e Villalobos (2009) apresentaram uma revisão com objetivos mais abrangentes, classificando os trabalhos de acordo com abordagens de otimização utilizadas, os tipos de produtos considerados e o escopo geral dos problemas estudados.

Alguns dos artigos revisados, assim como este trabalho, são aplicados a produtos não perecíveis e estão preocupados com decisões de processamento, transporte e armazenagem ao longo da cadeia. Dentre eles, Gigler *et al.* (2002) utilizaram um algoritmo de programação dinâmica com o objetivo de abastecer uma planta geradora de energia com biomassa de salgueiro, garantindo padrões estabelecidos de qualidade e aparência do produto. Jones *et al.* (2003) propuseram e aplicaram um modelo de programação linear para o planejamento da produção de sementes de milho para uma empresa norte-americana. O objetivo é planejar as atividades realizadas na América do Sul, cuja safra ocorre depois que as demandas na América do Norte são conhecidas. Outro trabalho interessante é o de Apaiah e Hendrix (2005), em que um modelo também de programação linear foi proposto e aplicado com sucesso a uma cadeia real na Holanda de produção e fornecimento de proteína à base de ervilha para consumo humano.

No Brasil, destacam-se principalmente os trabalhos de Junqueira e Morabito (2006, 2008), em que um modelo de otimização linear para a programação da produção, estocagem e logística de sementes de milho foi proposto e aplicado, utilizando dados realistas e de uma empresa do setor. No complexo da soja, Dubke (2006) propôs um modelo de programação inteira mista para a localização de terminais especializados para a exportação da soja e seus derivados, cujo objetivo é determinar os serviços e as capacidades a serem instalados nos principais portos brasileiros. Essas decisões dependem da lucratividade da soja em grão, do farelo e do óleo de soja, dos custos fixos de investimentos em armazéns, esmagadoras e refinarias, além dos custos variáveis de transporte na rede e dos serviços prestados nos terminais especializados.

3. O Problema de Planejamento Operacional na Cadeia Agroindustrial da Soja

Dado um conjunto P de produtos, definido por $P = \{\mathbf{G} = \text{soja em grão}, \mathbf{F} = \text{farelo de soja}, \mathbf{B} = \text{óleo bruto}, \mathbf{R} = \text{óleo refinado}\}$, pode-se dividi-lo em dois subconjuntos disjuntos e mutuamente exaustivos de granéis sólidos $P_1 = \{\mathbf{G}, \mathbf{F}\}$ e líquidos $P_2 = \{\mathbf{B}, \mathbf{R}\}$. Em um horizonte de tempo T discretizado em períodos, tal que $T = \{1, 2, \dots, \tau\}$, deseja-se, a partir das ofertas da soja em grão disponíveis, planejar as operações de transporte, industrialização e armazenagem necessárias para atender às demandas de todos os produtos em todos os períodos. Essas decisões podem ser representadas por um grafo E-OU (*AND-OR graph*), como mostrado na figura 1.

A partir das regiões de oferta V_O , a soja em grão disponível em cada período $a_i^t, i \in V_O, t \in T$ pode ser adquirida e transportada para as regiões de demanda V_D ou as indústrias W , sendo perdida caso não seja escoada. As operações industriais, mostradas pelos arcos em negrito e destacadas verticalmente na figura, são realizadas sobre as matérias-primas $MP = \{\mathbf{G}, \mathbf{B}\}$ e divididas em esmagamento e refino. Na primeira etapa, soja em grão é esmagada e gera simultaneamente farelo e óleo bruto. Antes de voltar à rede de transporte, como ocorre com o farelo, o óleo bruto pode passar por uma segunda operação industrial e gerar óleo refinado. Além de atender às demandas $d_{pj}^t, p \in P, j \in V_D, t \in T$, os produtos podem ser estocados ao longo do tempo. Nesse caso, o balanço dos estoques em cada período está representado por arcos tracejados e destacados horizontalmente.

As atividades de transporte, indicadas pelos demais arcos ainda na figura 1, ocorrem em uma rede intermodal, como a mostrada na figura 2. Cada modal é representado por um grafo direcionado, $G_m = (V_m, A_m)$, $m = \{1 = \text{rodoviário}, 2 = \text{ferroviário}, 3 = \text{hidroviário}\}$, em que V_m

representam os conjuntos de vértices e A_m os conjuntos de arcos, sendo os últimos indicados por arcos horizontais cheios. Os terminais intermodais são representados por um conjunto de arcos A_T , verticais e tracejados, que ligam duas redes modais distintas. Essa notação foi introduzida por Arnold *et al.* (2004), sendo vantajosa para a representação de múltiplos transbordos em uma única rota, como no caso da rota $G3 \rightarrow H3 \rightarrow H1 \rightarrow I1 \rightarrow I2 \rightarrow J2$, que passa por dois terminais, enquanto em $A1 \rightarrow B1 \rightarrow B2 \rightarrow C2$ e em $D1 \rightarrow E1 \rightarrow E3 \rightarrow F3$ apenas um terminal é utilizado.

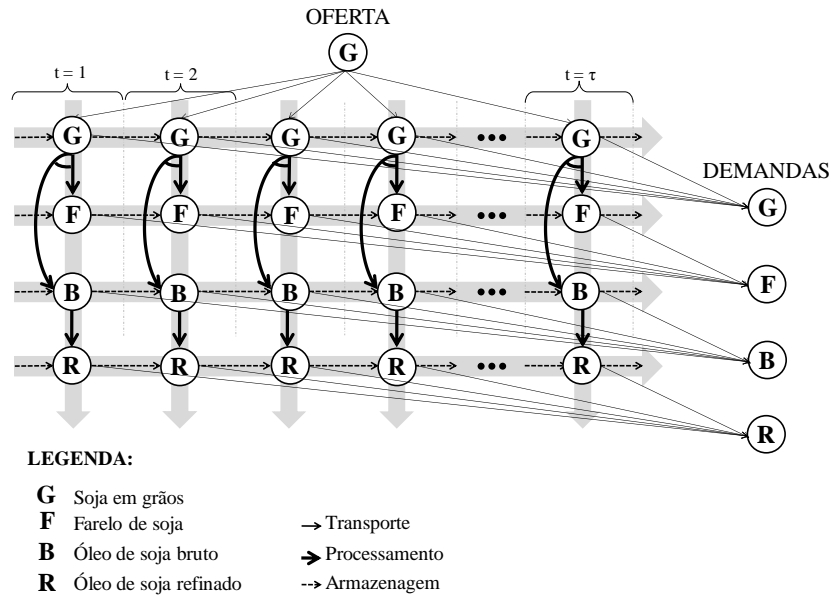


Figura 1: Decisões no planejamento operacional da cadeia agroindustrial da soja

O problema pode ser representado por um multigrafo direcionado $G=(V,A)$, em que o conjunto de vértices V e de arcos A são dados por $V=V_O \cup V_D \cup V_E \cup W \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3$ e $A=A_T \cup A' \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3$, respectivamente. O conjunto V_E é formado pelos vértices de estoque localizados nos terminais intermodais, incluindo-se os portos, enquanto o conjunto de arcos A' liga os vértices de oferta, demanda, industrialização e estoque às redes modais. Por comodidade, as processadoras foram divididas em subconjuntos de W , de acordo com os serviços disponibilizados: W_1 para as esmagadoras, W_2 para as refinarias e W_3 para as unidades que realizam esmagamento e refino.

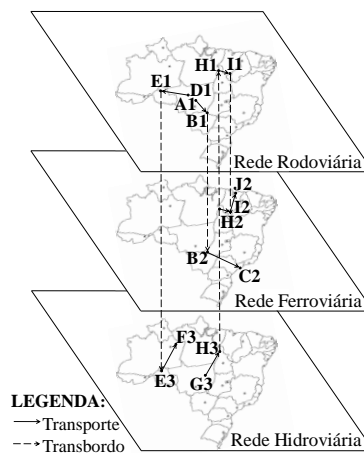


Figura 2: Estrutura intermodal formada por múltiplas redes de transporte

Definem-se as variáveis de fluxo de transporte e de transbordo nos terminais intermodais e portos $x_{pij}^t \geq 0, p \in P, (i, j) \in A, t \in T$, que consomem um tempo de viagem ou de transferência $\gamma_{ij}, (i, j) \in A$ ao longo do arco e estão sujeitas às capacidades $\mu_{ij}, (i, j) \in A$; que representam as quantidades de matéria-prima processada nas unidades industriais $z_{pw}^t \geq 0, p \in MP, w \in W, t \in T$, com tempo de processamento $\delta_{pw}, p \in MP, w \in W$ e capacidade $\lambda_{pw}, p \in MP, w \in W$, gerando quantidades de produtos derivados proporcionais a $\alpha_p \leq 1, p \in P / p \neq G$; e também de estoque $s_{pl}^t \geq 0, p \in P, l \in W \cup V_E, t \in T$.

Os granéis sólidos podem ser armazenados nos silos ou armazéns gerais enquanto os granéis líquidos podem ser alocados aos tanques ou armazéns gerais. Os silos e os tanques comportam apenas um produto por vez, sem custos de preparação para troca de produto. Os armazéns gerais podem estocar qualquer produto, desde que estejam ensacados ou acondicionados em tonéis. Nos estoques mantidos nas processadoras e nos terminais intermodais, os produtos são distribuídos em três tipos de instalações: um conjunto de silos $K_{1w}, w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E$, tanques $K_{2w}, w \in W \cup V_E$ e armazéns gerais $K_{3w}, w \in W \cup V_E$, cujas capacidades instaladas são dadas por $\rho_{wk}, w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, k \in K_{1w}$, $\sigma_{wk}, w \in W \cup V_E, k \in K_{2w}$ e $\theta_{wk}, w \in W \cup V_E, k \in K_{3w}$. Definem-se as variáveis binárias $n_{pww}^t \in \{0,1\}, p \in P_1, w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, k \in K_w, t \in T$ para atribuição de produtos aos silos e $o_{pww}^t \in \{0,1\}, p \in P_2, w \in W \cup V_E, k \in K_w, t \in T$ para os tanques, que são iguais a 1 se o produto p é armazenado na unidade k na processadora ou terminal intermodal w no período t ou 0, caso contrário. As quantidades de granéis sólidos e líquidos em estoque, dadas pelas variáveis não-negativas $u_{pww}^t \geq 0, p \in P_1, w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, k \in K_w, t \in T$ para os silos, $v_{pww}^t \geq 0, p \in P_2, w \in W \cup V_E, k \in K_w, t \in T$ para os tanques, e nos armazéns de uso geral, representadas por $e_{pww}^t \geq 0, p \in P, w \in W \cup V_E, k \in K_w, t \in T$, precisam ser compatíveis com as quantidades totais armazenadas nas unidades processadoras e nos terminais intermodais.

Consideram-se os custos lineares de frete pela utilização do transporte rodoviário $c_{(1)pij}^t, p \in P, (i, j) \in A_1, t \in T$, de transbordo de carga nos terminais intermodais $c_{(T)pij}^t, p \in P, (i, j) \in A_T, t \in T$, de processamento das matérias-primas $f_{pw}^t, p \in MP, w \in W, t \in T$ nas unidades industriais, de armazenagem nos silos $h_{(1)pw}^t, p \in P_1, w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, t \in T$, tanques $h_{(2)pw}^t, p \in P_2, w \in W \cup V_E, t \in T$, armazéns gerais $h_{(3)pw}^t, p \in P, w \in W \cup V_E, t \in T$, além dos custos de falta $g_{pj}^t, p \in P, j \in V_D, t \in T$. Os custos de armazenagem são diferentes em função das necessidades específicas de manuseio e embalagem nos silos, tanques e armazéns gerais, e os custos de falta são cobrados sobre as quantidades de demanda não atendidas, computadas pelas variáveis $b_{pj}^t \geq 0, p \in P, j \in V_D, t \in T$.

Os custos de transporte ferroviário e hidroviário consideram economias de escala e são representados por funções côncavas lineares por partes (CROXTON *et al.*, 2007). Para os modais $m = 2, 3$, em cada arco, o custo de transporte por unidade varia de acordo com a faixa de fluxo a ser transportada. Para cada arco $(i, j) \in A_m, m = 2, 3$, têm-se um conjunto de $R + 1$ pontos

$0 \leq L_{mij}^0 < L_{mij}^1 < \dots < L_{mij}^R$, que restringem o fluxo na faixa r , $r = 1, 2, \dots, R$, entre L_{mij}^{r-1} e L_{mij}^r . O custo de transporte na faixa r , $r = 1, 2, \dots, R$, é dado por c_{mijr}^t , $(i, j) \in A_m, m = 2, 3, t \in T$, de modo que $c_{mij1}^t > c_{mij2}^t > \dots > c_{mijR}^t > 0$. São definidas as variáveis binárias $y_{mijr}^t \in \{0,1\}$ para selecionar a faixa r a ser utilizada no arco $(i, j) \in A_m, m = 2, 3$, no período $t \in T$, e $\chi_{mpijr}^t \geq 0$ de fluxo do produto $p \in P$ na faixa selecionada. Assim, definida uma faixa \hat{r} , o custo de transportar o produto $p \in P$, num arco $(i, j) \in A_m, m = 2, 3$, num período t , é dado por $c_{mij\hat{r}}^t \chi_{mpij\hat{r}}^t + \beta_{mij\hat{r}}^t y_{mij\hat{r}}^t$, em que $\beta_{mij\hat{r}}^t$ é o ponto de intersecção com o eixo das ordenadas. Note que se pode ter para o limitante inferior da faixa 1, $L_{mij}^0 > 0$, situação em que o modal só é ativado a partir de um volume mínimo de fluxo. A figura 3 ilustra essa situação considerando duas faixas.

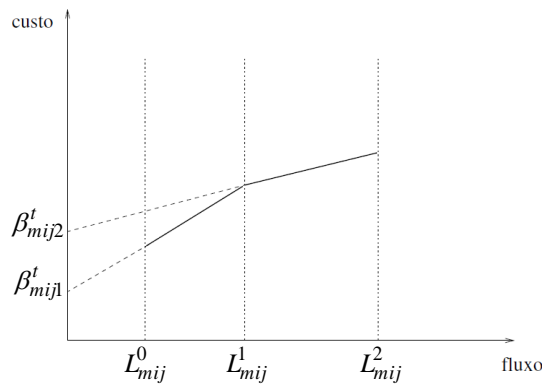


Figura 3: Estrutura dos custos côncavos cobrados nas ferrovias e hidrovias

O modelo de planejamento operacional na cadeia agroindustrial da soja pode então ser formulado pelas equações (1) a (33) a seguir:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A_1} \sum_{t \in T} c_{(1)pij}^t x_{pij}^t + \sum_{m=2,3} \sum_{(i,j) \in A_m} \sum_{t \in T} \sum_{r=1}^R (c_{mijr}^t \sum_{p \in P} \chi_{mpijr}^t + \beta_{mijr}^t y_{mijr}^t) \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A_T} \sum_{t \in T} c_{(T)pij}^t x_{pij}^t + \sum_{p \in MP} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} f_{pw}^t z_{pw}^t \\
 & + \sum_{p \in P_1} \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} \sum_{k \in K_{1w}} \sum_{t \in T} h_{(1)pw}^t u_{pwk}^t + \sum_{p \in P_2} \sum_{w \in W \cup V_E} \sum_{k \in K_{2w}} \sum_{t \in T} h_{(2)pw}^t v_{pwk}^t \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W \cup V_E} \sum_{k \in K_{3w}} \sum_{t \in T} h_{(3)pw}^t e_{pwk}^t + \sum_{p \in P} \sum_{j \in V_D} \sum_{t \in T} g_{pj}^t b_{pj}^t \tag{1}
 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V|(i,j) \in A'} x_{pij}^t \leq a_i^t \quad p = \mathbf{G}, \forall i \in V_o, \forall t \in T \tag{2}$$

$$\sum_{i \in V|(i,j) \in A'} x_{pij}^{t-\gamma_{ij}} + b_{pj}^t = d_{pj}^t \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \tag{3}$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{G}, \forall w \in W_i \cup W_3, \forall t \in T \quad (4)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{F}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \quad (5)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6)$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{B}, \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (7)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{qiw}^{t-\gamma_{iw}} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t + z_{qw}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (8)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{B}, q = \mathbf{R}, \forall w \in W_2 \cup W_3, \forall t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V|(i,l) \in A} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} = \sum_{j \in V|(l,j) \in A} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_1 \cup V_2 \cup V_3, \forall t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{i \in V|(i,l) \in A'} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} + s_{pl}^{t-1} = s_{pl}^t + \sum_{j \in V|(l,j) \in A'} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{p \in P} x_{pij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (12)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda_{pw} \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{p \in P_1} n_{pwk}^t \leq 1 \quad \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (14)$$

$$u_{pwk}^t \leq \rho_{wk} n_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (15)$$

$$s_{pw}^t = \sum_{k \in K_{1w}} u_{pwk}^t + \sum_{k \in K_{3w}} e_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall t \in T \quad (16)$$

$$n_{pwk}^t \leq u_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{p \in P_3} o_{pwk}^t \leq 1 \quad \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (18)$$

$$v_{pwk}^t \leq \sigma_{wk} o_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (19)$$

$$s_{pw}^t = \sum_{k \in K_{2w}} v_{pwk}^t + \sum_{k \in K_{3w}} e_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall t \in T \quad (20)$$

$$o_{pwk}^t \leq v_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (21)$$

$$\sum_{p \in P} e_{pwk}^t \leq \theta_{wk} \quad \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{3w}, \forall t \in T \quad (22)$$

$$L_{mij}^{r-1} y_{mijr}^t \leq \sum_{p \in P} \chi_{mpijr}^t \leq L_{mij}^r y_{mijr}^t \quad \forall (i, j) \in A_m, m = 2,3, \forall t \in T, r = 1,2,\dots,R \quad (23)$$

$$\sum_{r=1}^R y_{mijr}^t \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_m, m = 2,3, \forall t \in T \quad (24)$$

$$x_{pij}^t = \sum_{r=1}^R \chi_{mpijr}^t \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A_m, m = 2,3, \forall t \in T \quad (25)$$

$$x_{pij}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (26)$$

$$z_{pw}^t \geq 0 \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (27)$$

$$s_{pw}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall w \in W \cup V_E, \forall t \in T \quad (28)$$

$$u_{pww}^t \geq 0, n_{pww}^t \in \{0,1\} \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_w, \forall t \in T \quad (29)$$

$$v_{pww}^t \geq 0, o_{pww}^t \in \{0,1\} \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_w, \forall t \in T \quad (30)$$

$$e_{pww}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_w, \forall t \in T \quad (31)$$

$$b_{pj}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall j \in D, \forall t \in T \quad (32)$$

$$y_{mijr}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_m, m = 2,3, \forall t \in T, r = 1,2,\dots,R \quad (33)$$

A função objetivo (1) visa à minimização dos custos de transporte rodoviário, ferroviário, hidroviário, transbordo, de processamento de matéria-prima, de armazenagem nos silos, nos tanques e nos armazéns gerais localizados nas processadoras e nos terminais intermodais e dos custos de não atendimento da demanda, respectivamente. Dentre eles, os custos de transporte ferroviário e hidroviário consideram economias de escala representadas por funções côncavas lineares por partes, enquanto os demais são representados por funções lineares.

As restrições (2) representam o escoamento da soja em grão ofertada em cada período. Em (3), têm-se o balanço das demandas atendidas e não atendidas para todos os produtos em todos os períodos. As restrições (4) a (9) fazem o balanço de entrada, transformação, armazenagem e saída dos produtos nas unidades industriais. Em (4), é feito o balanço da soja em grão utilizada como matéria-prima nas esmagadoras e unidades que realizam esmagamento e refino. Em (5), ocorre o balanço de farelo de soja em unidades industriais dos mesmos tipos. Em (6), (7) e (8), tem-se o balanço de óleo bruto nas esmagadoras, nas refinarias e nas unidades que realizam esmagamento e refino, respectivamente. As diferenças entre os três casos são mostradas na figura 3. Em $w \in W_1$ (figura 4.a), o óleo bruto é obtido a partir do esmagamento da soja em grão e flui para a rede de transportes; em $w \in W_2$ (figura 4.b), o óleo bruto chega para ser refinado e em seguida é comercializado, fluindo para a rede de transporte novamente; em $w \in W_3$ (figura 4.c), o óleo bruto pode ser gerado ou vir de outra unidade, decidindo-se também entre o comércio direto ou pelo refino. Em (9), apresenta-se o balanço de óleo refinado nas refinarias e nas unidades que realizam esmagamento e refino. Em (10) a conservação de massa é garantida para os vértices das redes de transporte, enquanto em (11) ocorre o balanço de estoque nos terminais intermodais. As restrições (12) e (13) impõem capacidades de transporte e transbordo na rede intermodal e de processamento de matéria-prima nas industriais.

De (14) a (22) são realizadas as alocações de produtos aos tipos de instalações de estocagem disponíveis. Em (14), cada um dos silos disponíveis em cada uma das processadoras em cada período é atribuído a um único produto, no máximo. Em (15), garante-se que se um silo está alocado a um granel sólido, a quantidade desse produto armazenada nesse silo deve respeitar os limites de capacidade, ou caso contrário, a quantidade armazenada deve ser nula. Em (16), divide-se a quantidade de cada granel sólido estocado em cada processadora em cada período nos silos e armazéns gerais disponíveis. Em (17), obriga-se a não alocação de silos não utilizados. De (18) a (21), as mesmas restrições são escritas para a alocação de granéis líquidos nos tanques. Em (22), garante-se que as capacidades dos armazéns gerais sejam respeitadas na alocação dos estoques de todos os produtos em todas as processadoras em todos os períodos.

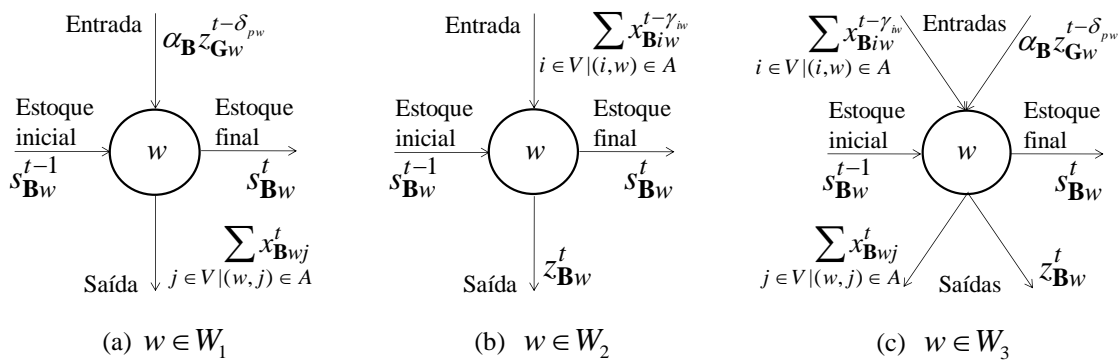


Figura 4: Fluxos de chegada, produção, armazenagem e saída do óleo bruto nas unidades industriais

As restrições (23) e (25) fazem a atribuição da faixa de custos a ser utilizada para os modais ferroviário e hidroviário pelo transporte de todos os produtos em todos os arcos em todos os períodos e garantem que apenas uma faixa de custos seja cobrada na função objetivo. As equações (26) a (33) definem os domínios das variáveis.

4. Resultados Computacionais Preliminares

Os experimentos com o modelo (1)-(33) foram realizados em um microcomputador Core 2 Duo 2.0, 4 Gb de RAM, com sistema operacional Windows Home Premium utilizando-se o AMPL/CPLEX 11.1 (FOURER *et al.*, 2002). Devido à dificuldade de obtenção de dados do sistema, apresenta-se uma rede ilustrativa, baseada em dados disponíveis principalmente em GEIPOT (2001), IBGE (2007), ANTAQ (2009), ANTT (2009) e ABIOVE(2010).

As cidades consideradas são apresentadas na tabela 1. São considerados 11 vértices de oferta, 9 de demanda, 4 unidades industriais e 12 terminais intermodais, dos quais 6 também funcionam como vértices de armazenagem. O horizonte de planejamento foi discretizado em 30 períodos de um dia, considerando dados de oferta e demanda típicos dos períodos de pico da safra da soja, que ocorre entre os meses de março e abril. Assim, procurou-se, em primeiro lugar, avaliar o comportamento dos fluxos de transporte, a transformação da soja em seus derivados e a utilização das unidades de armazenamento sob condições de congestionamento do sistema.

Tabela 1: Nomes e siglas das localidades consideradas na cadeia agroindustrial

Sigla	Localidade	Sigla	Localidade	Sigla	Localidade
AAR	Alto Araguaia (MT)	EST	Estreito (MA)	RON	Rondonópolis (MT)
ATA	Alto Taquari (MT)	GOI	Goiânia (GO)	RVE	Rio Verde (GO)
BOT	Botucatu (SP)	ITC	Itacoatiara (AM)	SAN	Santos (SP)
CAS	Cascavel (PR)	ITQ	Itaquí (MA)	SOR	Sorriso (MT)
CDS	Chapadão do Sul (MS)	NXA	Nova Xavantina (MT)	SSI	São Simão (GO)
CGR	Campo Grande (MS)	PAR	Paranaguá (PR)	UBE	Uberlândia (MG)
CNP	Campo Novo do Parecis (MT)	PDL	Primavera do Leste (MT)	VIT	Vitória (ES)
DOU	Dourados (MS)	PGR	Ponta Grossa (PR)	XAM	Xambioá (TO)

Conforme esperado, devido às restrições de capacidade da rede de transporte, os fluxos na rede se apresentam muito dispersos, utilizando-se de muitas rotas rodoviárias, de custo mais elevado. Os principais fluxos observados são mostrados na figura 5. Observa-se que à exceção dos fluxos de Campo Novo do Parecis para Itacoatiara, passando por Porto Velho, e de Nova Xavantina para Itaquí, passando por Xambioá e Estreito, que formam sistemas praticamente isolados, no restante da rede, ocorre uma competição visível pelo uso dos modais mais baratos.

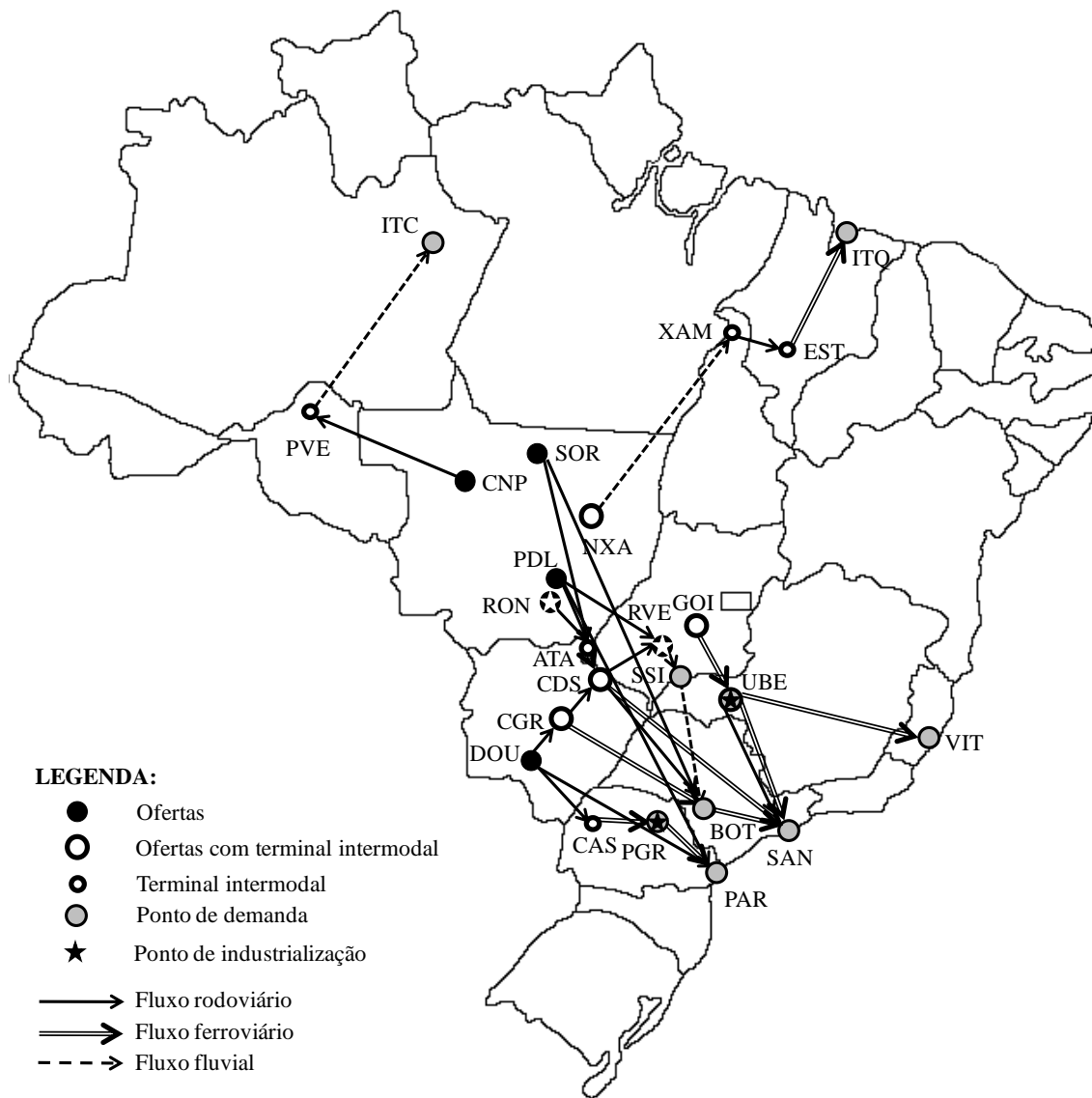


Figura 4: Padrão dos fluxos de transporte intermodal observado nos testes

Na região Sudeste, por exemplo, as ferrovias têm suas capacidades totalmente utilizadas, ocorrendo alguns desvios dos fluxos para o modal rodoviário, como ocorre com as produções de Sorriso, Primavera do Leste e Dourados, principalmente. Também ocorre o desvio do fluxo de Uberlândia, que em parte passa a fluir para Vitória pela Estrada de Ferro Vitória-Minas, parte passa a ser escoada por rodovia até Santos. Esse padrão observado nos resultados do modelo é compatível com os relatados em GEIPOT (2001) e por outros autores, como Ojima (2006).

As unidades industriais, localizadas nas cidades de Rio Verde e Rondonópolis realizando o esmagamento da soja, em Uberlândia para refino do óleo bruto e em Ponta Grossa, oferecendo tanto os serviços de esmagamento e refino, não apresentaram altos índices de

utilização nos testes realizados. Essa situação é descrita em alguns relatórios da ABIOVE(2010), que afirmam que nos períodos de pico de safra as empresas concentram suas atividades na exportação do grão, armazenando matéria-prima para processamento futuro. No modelo, esse comportamento pode ser explicado pela falta de dados apurados para representação dos custos de não atendimento à demanda, que fazem com que a exportação direta se torne mais atrativa, por não incorrer em custos de industrialização. Assim, nos períodos em que as demandas superaram as quantidades ofertadas, o não atendimento das demandas pelos produtos industrializados se tornou mais econômica, produzindo melhores valores para a função objetivo.

As unidades de estoque na rede, localizadas nos terminais intermodais de Alto Taquari, Chapadão do Sul, Rondonópolis, Rio Verde, São Simão e Ponta Grossa, tiveram seus silos e armazéns totalmente ocupados nos períodos em que se observou um excedente de oferta em relação à demanda. Nesses locais, principalmente nos terminais com localizações mais centralizadas na rede, como Alto Taquari e São Simão, observou-se a manutenção de níveis máximos de armazenamento da soja em grão, tanto nos silos quanto nos armazéns, por um número maior de dias dentro do horizonte considerado. Apenas em Ponta Grossa, que conta com uma unidade industrial, se observou a manutenção de estoques de farelo para atender a demandas futuras. As produções de óleo foram escoadas assim que o processo industrial se encerrou.

Embora os resultados apresentados sejam ilustrativos e sirvam apenas para se verificar a coerência do modelo em relação a algumas variações nos padrões de oferta e demanda, verificou-se o rápido crescimento do tempo computacional requerido para resolução do modelo quando se aumentam os números de silos e tanques na rede. A título de ilustração, nos 10 cenários utilizados para essa análise preliminar, com 21 silos e 24 tanques distribuídos em 4 unidades industriais e 6 terminais intermodais, o tempo médio para a obtenção da solução ótima ficou em torno de 16 segundos. Ao se testar um cenário com 76 silos e 86 tanques, número ainda pequeno em relação à rede real, o CPLEX retornou estouro de memória após 2,4 horas de processamento sem encontrar nenhuma solução factível para o problema.

5. Considerações Finais

A cadeia agroindustrial da soja no Brasil apresenta grande importância econômica e tem despertado o interesse de pesquisadores nos últimos anos, devido principalmente às dificuldades de roteirização dos fluxos na rede intermodal disponível. Mas outras atividades, tais como o planejamento operacional de transformação da soja em seus derivados e a alocação dos produtos desse complexo aos diferentes tipos de instalações industriais disponíveis poderiam ser melhor exploradas. Nesse contexto, apresentou-se um modelo de planejamento operacional, considerando a coordenação das atividades de industrialização, transporte e armazenagem dos quatro principais produtos do complexo da soja: o grão, o farelo e os óleos bruto e refinado.

O modelo de fluxos em redes proposto, apesar de se encontrar em fase bastante preliminar de testes, representa bem várias particularidades do sistema real. Dentre elas, pode-se citar a consideração de economias de escalas nos modais ferroviário e hidroviário, que só são ativados a partir de determinados volumes a serem transportados; a alocação dos produtos aos silos e tanques ao longo da rede, incorrendo em custos mais atrativos que os dos armazéns gerais e os próprios fluxos na cadeia industrial, que consideram as perdas de massa dos processos. Como pesquisas em andamento e perspectivas futuras para o trabalho, pode-se citar a coleta de dados para aplicação do problema a uma rede mais realista e a construção de métodos de resolução para o problema, podendo-se considerar a construção de métodos exatos ou heurísticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pelo apoio dado a essa pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ABIOVE**, Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais: complexo da soja - exportações, (http://www.abiove.com.br/exporta_br.html), 2010.
- Ahumada, O e Villalobos, J. R.** (2009), Application of planning models in the agri-food supply chain: a review, *European Journal of Operational Research*, 195, 1-20.
- ANTAQ**, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Principais portos brasileiros, (<http://www.antaq.gov.br/Portal/pdf/Portos/Santos.pdf>), 2009.
- ANTT**, Agência Nacional de Transportes Terrestres, Relatório anual, (<http://www.antt.gov.br/relatorios/ferroviario/concessionarias2007/index.asp>), 2009.
- Apaiah, R. K. e Hendrix, E. M. T.** (2005), Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods, *Journal of Food Engineering*, 70, 383-391.
- Arnold, P.; Peeters, D. e Thomas, I.** (2004), Modelling a rail/road intermodal transportation system, *Transportation Research Part E*, 40, 255-270.
- Bunge Alimentos do Brasil**, A Empresa: quem é a Bunge Alimentos S. A., (<http://www.bungealimentos.com.br/empresa/empresa.asp>), 2010.
- Caramuru Alimentos**, (<http://www.caramuru.com>), 2010.
- Cargill**, Complexo da soja, (<http://www.cargill.com.br/brazil/pt/home/produtos-servicos/agricola/complexo-soja/index.jsp>), 2010.
- Croxton, K. L.; Gendron, B. e Magnanti, T. L.** (2007), Variable disaggregation in network flow problems with piecewise linear costs, *Operations Research*, 55 (1), 146-157.
- Dubke, A. F.**, Modelo de localização de terminais especializados: um estudo de caso em corredores de exportação de soja, *Tese de Doutorado em Engenharia Industrial*, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.
- Fourer, R., Gay, D. M. e Kernighan, B. W.**, *AMPL: a modeling language for mathematical programming*, Cole Publishing Company, LOCAL, 2002.
- GEIPOT**, Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes, Corredores estratégicos de desenvolvimento: alternativas de escoamento de soja para exportação, (http://www.geipot.gov.br/estudos_realizados/soja/index.htm), 2001.
- Gigler, J. K., Hendrix, E. M. T., van den Hazelkamp, V. G. W. e Meerdink, G.** (2002), On optimization of agri chains by dynamic programming, *European Journal of Operational Research*, 139, 613-625.
- IBGE**, Instituto Brasileiro de Geociência e Estatística. Produção Agrícola Municipal. Sistema IBGE de Dados Agregados – SIDRA. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, IBGE, (www.ibge.gov.br), 2007.
- Jones, P. C., Kegler, G., Lowe, T. J. e Traub, R. D.** (2003), Managing the seed-corn supply chain at Syngenta, *Interfaces*, 33 (1), 80-90.
- Junqueira, R. A. R. e Morabito, R.** (2006), Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho, *Produção*, 16 (3), 510-525.
- Junqueira, R. A. R. e Morabito, R.** (2008), Planejamento otimizado da produção e logística de sementes de milho: um estudo de caso, *Gestão e Produção*, 15 (2), 367-380.
- Kussano, M. R. e Batalha, M. O.** (2009), Custos logísticos do escoamento da soja em grão brasileira para o mercado externo, *Revista Ingepro*, 1 (1), 27-38.
- Louis Dreyfus Commodities do Brasil**, Soja: parceria com a produção, (http://www.ldcommodities.com.br/web_portugues/soja.asp), 2010.
- Lowe, T. J. e Preckel, P. V.** (2004), Decision technologies for agribusiness problems: a brief review of selected literature and a call for research, *Manufacturing and Services Operations Management*, 6 (3), 201-208.
- Mendes, J. T. G. e Padilha Júnior, J. B. P.** (2008), Estratégias de comercialização da soja: análise de portfólios, sob condições de risco, *Produção*, 18 (3), 441-451.
- Ojima, A. L. R. O.** (2006), Perfil da logística de transporte de soja no Brasil, *Informações Econômicas*, 36 (1), 17-25.
- USDA**, United States Department of Agriculture: Oilseeds - Foreign Agriculture Service, Market and Trade Data, Production, Supply and Distribution Online, (www.fas.usda.gov), 2008.