

UM MODELO PARA A LOGÍSTICA DO ABATE DO GADO DE CORTE¹

José Francisco Ferreira Ribeiro^{a*}, Marcio Mattos Borges de Oliveira^a,
Marcelo Alvares Cruz Filho^a

^aFaculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto
Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto-SP, Brasil

Recebido 01/04/2018, aceito 25/06/2018

RESUMO

Neste artigo é apresentado um modelo matemático linear em variáveis inteiras para auxiliar o produtor rural a determinar a solução mais rentável, escolhendo o melhor frigorífico, a melhor estrada e o melhor caminhão para realizar o transporte das cabeças de gado para o abate. O modelo proposto leva em consideração a capacidade dos frigoríficos e dos caminhões disponíveis, bem como as diferentes rotas para efetuar o transporte do gado. Nos testes realizados, o modelo proposto foi resolvido pela versão gratuita do *software* LINGO. Os resultados obtidos foram superiores ou iguais àqueles fornecidos pelo método manual de tomada de decisão empregado pelos técnicos da fazenda.

Palavras-chave: Transporte, Manejo, Bem-estar animal, Otimização.

ABSTRACT

This paper presents a linear mathematical model in integer variables to help the rural producer to determine the most profitable solution, by choosing the best slaughter plant, the best road and the best truck to carry the livestock for slaughtering. The model proposed takes into account the capacity of the slaughter plants and trucks available, as well as the different routes to transport the cattle. In the tests performed, the model was solved by the free version of LINGO. The results obtained were better than or equal to those provided by the manual decision-making method used by the farm technicians.

Keywords: Transport, Animal handling, Animal welfare, Optimization.

*Autor para correspondência. E-mail: jffr@fearp.usp.br.
DOI: 10.4322/PODes.2018.004

¹Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.

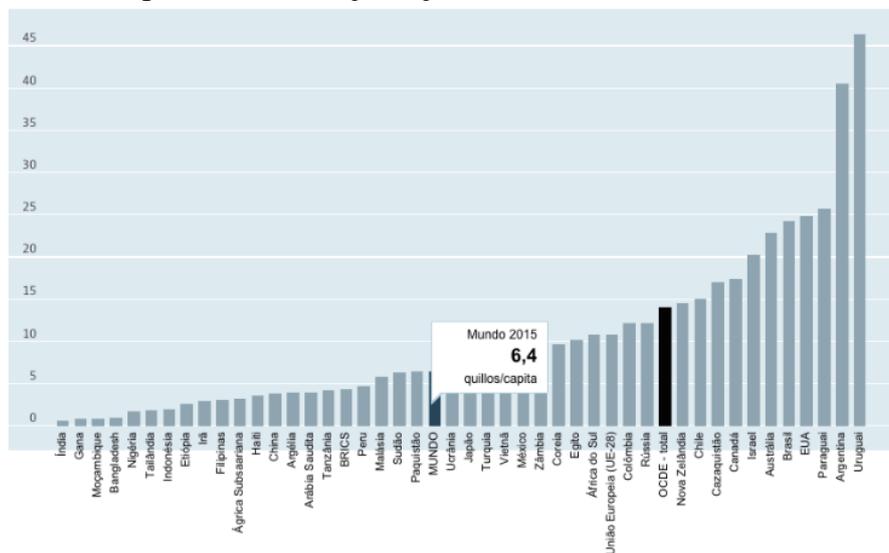
1. Introdução

O Brasil é um país de dimensões continentais e, em razão disso, possui uma capacidade potencial de produção muito grande em todos os setores da atividade agropecuária. O clima e a diversidade de tipos de solo possibilitam, e tornam-se fatores facilitadores, em grande medida, para o Brasil ser um grande *player* mundial em produção agrícola. Nosso país é referência mundial em produção de alguns produtos agropecuários, como carne bovina e soja, por exemplo. Tais produtos representam uma parcela importante no PIB brasileiro, onde a agropecuária mostra-se fundamental.

Segundo o IBGE, o agronegócio representou 21% do PIB brasileiro em 2015. Do total referente ao PIB do agronegócio brasileiro (1,27 trilhões de reais), a pecuária representa 31,5%, ou seja, só esta atividade representa 0,40 trilhões de reais (BEEFPOINT, 2016). A pecuária brasileira tem grande importância na produção internacional de carne. O setor representa 15% da produção mundial de carne, com 9.470.000 toneladas de um total de 61.318.000 toneladas produzidas (USDA, 2017).

Por outro lado, segundo a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) o Brasil era, em 2013, o sexto maior consumidor de carne (bovina, suína e de aves) do mundo, com um consumo de aproximadamente 78 Kg per capita por ano (FORBES, 2015). Em novo estudo realizado pelo mesmo órgão, em 2015, o Brasil foi apontado como o quinto maior consumidor de carne bovina do mundo, com um consumo médio de aproximadamente 24 Kg de carne bovina/capita por ano (BEEFPOINT, 2016). A Figura 1 ilustra esta informação.

Figura 1: Consumo per capita de carne bovina no mundo.



Fonte: FORBES (2015).

O Brasil é o segundo maior produtor de carne bovina do mundo há pelo menos quatro anos (desde 2013, com projeção para 2017 de se manter nessa posição). De um total de 60.466.000 toneladas de carne bovina produzidas no mundo em 2016, 9.284.000 são produzidas em solo brasileiro (15,35% de toda produção). O maior produtor mundial de carne bovina são os Estados Unidos, com uma produção total de 11.502.000 toneladas produzidas que representam 19% do mercado mundial de carne bovina. Vale ressaltar que 65,85% ou 39.816.000 toneladas são produzidas por cinco *players* (Estados Unidos, Brasil, União Europeia, China e Índia (USDA, 2017). Dos 10 principais consumidores de carne bovina brasileira, 3 estão na Ásia (Hong Kong, China e Rússia), 3 na Europa (Itália, Países Baixos e Reino Unido), 2 na América do Sul (Chile e Venezuela), 1 na África (Egito) e 1 na América do Norte (Estados Unidos). Segundo a Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes (ABIEC), em 2016 esses países foram responsáveis por 73% dos 5,5 bilhões de dólares correspondentes aos valores

em exportação, e 74% do total de 1,4 milhão de toneladas exportadas (ABIEC, 2017). A Tabela 1 fornece o total de carne brasileira exportada por destino.

Tabela 1: Exportações Brasileiras de Carne Bovina por Destino.

Destino	US\$ (000)	Toneladas	US\$/Tonelada
Hong Kong	1145445	330510	3,46568939
China	706298	165754	4,2611219
Egito	551273	176872	3,11679067
Rússia	408157	138785	2,94093022
Chile	300961	71027	4,23727597
Estados Unidos	284454	33269	8,55012173
Itália	190395	30642	6,21353045
Países Baixos	179739	22665	7,93024487
Reino Unido	140365	30666	4,57721907
Venezuela	131933	29239	4,51222682
Outros	1476742	371005	3,98038301
Total	5515762	1400434	3,93860903

Fonte: ABIEC (2017).

O sistema rodoviário brasileiro apresenta nítidos problemas para o escoamento da produção da pecuária nacional (CNT, 2016). Em todo território, e principalmente em importantes regiões produtoras de carne como os estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, a logística interfere diretamente na quantidade que o produtor cria e a quantidade que é disponibilizada no mercado. É comum que caminhões quebrem, tombem ou até mesmo atolem em nossas rodovias, representando, além de perdas econômicas para o produtor, perdas da quantidade de alimento disponível para a população brasileira e mundial.

A infraestrutura de transporte no Brasil é de baixa qualidade, causada principalmente pela falta de manutenção e investimentos, o que leva a uma perda não só para os produtores, mas também para a sociedade em geral. Em termos gerais, o Brasil poderia economizar até 1,5% do PIB se o setor de transportes fosse eficiente (Rocha, 2015). Uma condição melhor de transporte juntamente com a inserção de novos meios de transporte e investimentos em logística poderia representar um grande impacto e alavancar ainda mais o setor do agronegócio, uma vez que diminuiriam os custos de transporte e aumentaria a quantidade de produto (seja soja ou carne ou milho, etc.) que chega ao consumidor final.

Existem dois tipos de remuneração no mercado da carne ao produtor rural, o que explica, em grande parte, a relevância do estudo realizado. O primeiro tipo de remuneração considera o peso vivo, ou seja, o frigorífico pagará ao produtor um valor relativo ao peso do animal quando este está na fazenda (equivalente em arrobas), estimando um rendimento de carcaça.

O segundo considera o peso do animal já morto e limpo, e é neste caso que se aplica esta pesquisa, uma vez que peças de carne que são lesionadas no transporte são descartadas *a posteriori*, e o produtor não recebe por elas, ou seja, o produtor deixa de ganhar dinheiro neste caso, por causa de um transporte mal feito, más condições da estrada ou mesmo pelas grandes distâncias percorridas pelos caminhões.

Neste trabalho é realizado um estudo para a tomada de decisão relativa às seguintes operações: (I) Escolha do melhor estabelecimento frigorífico (em termos de preço) para realizar a entrega dos animais; (II) Escolha da melhor alternativa de rota ou estrada (em termos da diminuição da probabilidade de produzir lesões nos animais) para efetuar o transporte do gado ao frigorífico; (III) Escolha do melhor veículo (em termos da diminuição da probabilidade de produzir lesões nos animais) para realizar o transporte da propriedade agrícola ao frigorífico. O estudo realizado pode auxiliar na compreensão de como a logística de transporte impacta no produto final disponibilizado para o consumidor, uma vez que, por causa das más escolhas de

veículos, estradas e estabelecimentos, aliadas às más condições de muitas estradas brasileiras (principal meio de transporte utilizado nesta indústria) os animais se desidratam, lesionam e alguns acabam morrendo. Em outras palavras, existem perdas de produção que estão diretamente ligadas à logística do transporte dos animais das fazendas para os frigoríficos, e que precisam ser enfrentadas.

2. Referencial Teórico

As técnicas de manejo, transporte, embarque e desembarque de animais podem ter um efeito direto sobre o bem-estar e a rentabilidade dos mesmos. Estas operações podem causar muito estresse ao animal, e levar a escoriações e lesões que prejudicam o rendimento de carcaça, e afetam diretamente o peso do animal (Tarrant e Grandin, 2000). Por diversos fatores, o transporte por caminhões, se feito de maneira incorreta, pode causar lesões nos animais e impactar diretamente na qualidade da carne e na rentabilidade do produtor. Estima-se que milhões de dólares são perdidos por ano por produtores rurais devido a lesões que diminuem o valor da carcaça (Andrade et al., 2008).

Mendonça et al. (2016) realizaram um estudo com 4338 carcaças de 142 cargas de animais e concluíram que as principais causas dos hematomas que ocorrem nos transportes do gado são as rotas mais longas, as operações de carga e descarga, a utilização de caminhões de maior capacidade de carga e o sexo dos animais, uma vez que as fêmeas apresentaram 91% mais hematomas que os machos. Miranda-de la Lama et al. (2014) discutem o transporte do gado para o abate em termos de três nós logísticos: origem, escalas e matadouro. Fatores como custo de transporte, transportador, especificações de caminhões, condições de microambiente, densidade do carregamento, planejamento das rotas, acidentes com veículos e duração da jornada são levados em consideração, bem como as causas de mortalidade, o peso e os danos de carcaça.

As principais perdas, geralmente ocorrem nas primeiras horas e quilômetros do transporte dos animais. Em alguns casos, o ato de carregar e descarregar (por si só) é capaz de impactar negativamente em até 3% do peso vivo do animal (Barnes et al., 2007). Nas regiões onde a pecuária é mais desenvolvida e a tecnologia é mais presente, o transporte através dos caminhões prevalece. No entanto, apesar do transporte por caminhões ser mais rápido, ele pode apresentar problemas por causa da falta de infraestrutura de qualidade no país, que impactam diretamente na competitividade da carne brasileira, ainda mais na indústria de commodities, que possui alta competitividade e pouca diferenciação de produtos.

No Brasil, não há regulamentação para o transporte de gado bovino, no que diz respeito à manutenção do bem-estar animal. Na contramão do que praticamos aqui, existem países que possuem leis específicas que regulamentam esse tipo de transporte, e que visam garantir a qualidade do produto entregue ao consumidor final. O bem-estar animal está relacionado ao potencial de sofrer estresse, lesões, fadiga e mortalidade (Schwartzkopf-Genswein et al., 2012). Por isso, nos Estados Unidos, Canadá e União Europeia existem leis que regulamentam o transporte visando o bem-estar animal e como consequência mais qualidade da carne, uma vez que o animal chega ao destino menos estressado e lesionado. No Canadá, por exemplo, o tempo máximo que um animal pode ficar dentro do meio de transporte é de 52 horas. Após esse tempo, o animal deve ser descarregado para descansar e se recuperar do estresse. Nos Estados Unidos, a forragem é exigida quando a temperatura é menor que 10° C (Gray e Welby, 1997). Na União Europeia exige-se que o caminhoneiro pare para descansar a cada 8 horas de viagem, e viagens mais longas só são permitidas se os animais possuem espaço para deitar e descansar (Tarrant e Grandin, 2000).

O objetivo deste trabalho é propor um método para decidir a logística de venda e de transporte das cabeças de gado, de modo a assegurar ao produtor rural a solução de maior rentabilidade. Um modelo matemático original é proposto, uma vez que não foi encontrado na literatura um modelo apropriado para resolver o problema em questão. No modelo proposto a tomada de decisão relativa ao melhor frigorífico para o abate também leva em consideração a redução das perdas de dinheiro relacionadas com o transporte dos animais.

O problema de roteamento de veículos é a base de muitos métodos propostos na literatura para efetuar o planejamento da entrega física de bens e serviços aos clientes, dado um conjunto de restrições. Dos trabalhos pioneiros de pesquisa realizados na área (Dantzig e Ramser, 1959; Clarke e Wright, 1964) às publicações mais recentes, a literatura disponibiliza um grande número de modelos e abordagens de resolução exatas, heurísticas e metaheurísticas (Gutiérrez-Jarpa et al., 2010; Gendreau et al., 2006; Crevier et al., 2007; Jepsen et al., 2013; Mingozzi et al., 2013). Existem algumas variantes do problema de roteamento de veículos, formuladas a partir da natureza dos produtos transportados, da qualidade do serviço exigido e das características dos clientes e dos veículos. O problema de roteamento de veículos é NP-completo (Lenstra e Rinnooy Kan, 1981) e, em decorrência, exemplos de grande porte não podem ser resolvidos de maneira ótima por métodos exatos, o que explica o grande número de algoritmos aproximados disponíveis na literatura (Toth e Vigo, 2002; Laporte 2009; Kumar e Panneerselvam, 2012).

O problema do roteamento de veículos é amplamente estudado devido à sua aplicabilidade e à sua importância na determinação de estratégias eficientes para reduzir os custos operacionais nas redes de distribuição. Eksioglu et al. (2009) descrevem 1021 artigos publicados em periódicos entre 1959 e 2008 sobre o problema de roteamento de veículos, e apontam um crescimento exponencial do número de publicações sobre o tema da ordem de 6% ao ano. Uma revisão abrangente de modelos e métodos de resolução para problemas dinâmicos de roteamento de veículos é apresentada por Pillac et al. (2013). Um estudo realizado por De Jaegere et al. (2014) selecionou 144 artigos sobre o problema de roteamento de veículos publicados entre 2009 e 2013 para analisar as tendências atuais da literatura. Kumar e Panneerselvam (2012) realizam uma revisão de literatura sobre desenvolvimentos recentes e publicações envolvendo o problema de roteamento de veículos, especificamente sobre o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e o problema capacitado de roteamento de veículos.

Lucas e Chhajed (2004) fazem um levantamento de métodos desenvolvidos na área de pesquisa operacional desde 1950 até os dias de hoje para a resolução de problemas de localização e transporte na área de produção agropecuária. O modelo do transbordo de programação linear é usado por King e Logan (1964) para localizar e dimensionar as plantas de abates de bovinos da Califórnia. Zucchi et al. (2011) apresentam um modelo matemático dinâmico para determinar a localização de frigoríficos com base nos custos de instalação e transporte.

Gribkovskaia et al. (2006) propõem um modelo matemático de programação inteira mista para o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão com o objetivo de reduzir o custo do transporte do gado ao frigorífico, ao mesmo tempo em que mantém o nível de bem-estar animal e a qualidade da carne por meio de restrições de duração da rota. A decomposição de Dantzig-Wolfe é utilizada por Sigurd et al. (2004) para efetuar o planejamento do transporte de animais vivos segundo normas veterinárias estritas. A formulação divide o problema em um problema principal, dado por um tipo de problema de cobertura de conjuntos, e um subproblema que gera rotas legais para um único veículo. Oppen et al. (2010) resolvem o problema de roteamento de veículos para o transporte do gado ao frigorífico de maneira exata, com auxílio do método de geração de colunas, levando em conta várias restrições relacionadas ao bem-estar animal.

A busca tabu é a base dos métodos propostos por Oppen (2008), Oppen e Løkketangen (2008) e Krajewska e Kopfer (2009) para planejar o transporte de animais para o abate em frigoríficos. A partir dos testes realizados sobre o modelo proposto para a coleta e o transporte do gado, o primeiro conclui que a busca tabu costuma gerar soluções entre 12 e 21% melhores que as soluções obtidas manualmente. Oppen e Løkketangen (2008) resolvem o problema de roteamento de veículos relacionado ao transporte de animais para o abate na Noruega, onde as restrições de bem-estar animal incluem limites de duração da permanência do gado no veículo e a obrigatoriedade de misturar diferentes categorias de animais. O terceiro efetua o planejamento do transporte dos animais, calcula o frete e decide entre a utilização da frota própria para o transporte e as diferentes alternativas de subcontratação. Uma heurística de busca em vizinhança é proposta por Azi et al. (2012) para resolver o problema de roteamento de veículos, onde as

solicitações de clientes (fazendas e frigoríficos) ocorrem dinamicamente. Vernieuwe et al. (2010) utilizam a formulação do problema do caixeiro viajante e algoritmos heurísticos específicos para determinar o itinerário dos veículos em rotas que cumprem as regulamentações nacionais e internacionais em vigor.

Um modelo de otimização de rotas para o transporte de animais para o abate em frigoríficos da Suécia é proposto por Frisk et al. (2018) a partir de um estudo sobre os dados de um ano de transporte de mais de 3 milhões de cabeças de gado. O modelo desenvolvido procura minimizar o custo de transporte, ao mesmo tempo em que leva em consideração o bem-estar animal, por meio da minimização do número de paradas permitidas em cada rota e do tempo total de transporte dos animais. Higgins et al. (2015) desenvolveram a ferramenta TRANSIT para estimar os custos de transporte e a aplicaram à indústria pecuária do norte da Austrália, que consiste em 12 milhões de cabeças de gado, 10.000 empresas e 89.000 viagens. O TRANSIT leva em consideração as condições das estradas, os tipos de veículos utilizados, as restrições de acesso aos veículos e os requisitos regulamentares.

3. Metodologia

Este trabalho é uma pesquisa aplicada, com o objetivo de propor um modelo matemático para auxiliar o produtor rural a estimar suas perdas relacionadas com a logística do transporte de gado para o abate, avaliar as alternativas disponíveis e efetuar a tomada de decisão a respeito do melhor frigorífico (em termos de preço), melhor rota (ou estrada) e melhor meio de transporte (caminhão) para efetuar a venda das cabeças de gado, com menor perda de peso e, conseqüentemente, maior rentabilidade. Os dados utilizados para os testes computacionais realizados com o modelo proposto foram fornecidos pelos produtores rurais da Fazenda X, de Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil.

O modelo matemático proposto realiza uma abordagem quantitativa do problema, uma vez que a tomada de decisão é determinada com base no processamento de uma análise numérica da relação entre a realização do transporte das cabeças de gado (estabelecimento da logística de entrega dos animais para o abate, com a escolha do frigorífico, rota e caminhão) e a perda de peso relacionada com a logística do transporte.

A resolução do modelo matemático foi realizada pelo *software* LINGO, desenvolvido pela LINDO Systems. O LINGO foi escolhido pelas seguintes razões: (I) o LINGO dispõe de uma versão gratuita para resolver problemas com até 150 restrições, 300 variáveis reais, 30 variáveis inteiras e 30 variáveis se o problema é não linear, o que gera uma economia de gastos com *software*; (II) os problemas a serem resolvidos têm porte pequeno e médio, dentro do limite de variáveis de decisão da versão gratuita; (III) o LINGO tem programado o método *branch-and-bound* para resolução de problemas inteiros, capaz de resolver de maneira ótima os problemas propostos (Arenales et al., 2007); (IV) por ser uma interface simples, o treinamento dos operadores pode ser facilitado; (V) os resultados gerados são apresentados de forma direta, tornando a tomada de decisão intuitiva e satisfatória.

4. O Problema

O produtor rural, criador de gado de corte, precisa tomar decisão sobre três importantes variáveis: (I) Em qual frigorífico realizar a venda do gado; (II) Qual rota (ou estrada) utilizar para efetuar a entrega do gado; (III) Que caminhão empregar para transportar o gado da fazenda ao frigorífico. O objetivo do criador é obter a maior remuneração possível para o gado. Por um lado, o preço ofertado pelos frigoríficos é um dos fatores mais relevantes para a tomada de decisão. Por outro, as condições de transporte da carga (estrada escolhida e caminhão) podem interferir fortemente no preço final, uma vez que a ocorrência de contusões, fraturas, arranhões, exaustão metabólica, desidratação e estresse por calor, podem, em situações mais críticas, levar os animais a morte; e também em perdas que resultam em diminuição do valor ofertado pelo frigorífico.

O transporte e o manejo que antecedem o abate estão associados à produção de eventos estressantes, que comprometem tanto o bem-estar dos animais quanto a qualidade da carne (Ljungberg et al., 2007), causando sofrimento aos animais e perdas quantitativas e qualitativas da carne, com prejuízos diretos ou indiretos para produtores, frigoríficos e consumidores (Paranhos da Costa et al., 1998; Grandin, 2007). Em estudos realizados, Braggion e Silva (2004) reportam que em 100% das carcaças com pelo menos um hematoma, 31,4% dessas lesões tiveram origem no transporte.

O embarque, a viagem e o desembarque dos animais podem levar a perdas na qualidade das carcaças e da carne, com impactos econômicos negativos. As perdas de carne pela ocorrência de hematomas nas carcaças podem ser grandes, variando de 400 a 600 g de carne por hematoma (Paranhos da Costa et al., 1998; Andrade et al., 2008). Esta perda é relevante para a produção do peço final, e o estudo realizado neste artigo tem por meta auxiliar o produtor rural a tomar a melhor decisão.

5. O Modelo

Os dados para elaborar o modelo matemático e desenvolver a ferramenta computacional capaz de auxiliar o produtor rural no processo de tomada de decisão são os seguintes:

- N = Número total de cabeças de gado a transportar para o abate;
- G = Peso estimado das cabeças de gado (em arrobas);
- F = Número de frigoríficos disponíveis para o abate;
- R = Número de rotas que podem ser utilizadas para o transporte do gado;
- C = Número de caminhões disponíveis para o transporte do gado;
- T = número de caminhões a ser efetivamente usado no transporte do gado.
- CF_i = Capacidade de abate do frigorífico *i* (em cabeças de gado);
- A_i = Preço da arroba de boi pago no frigorífico *i* (em reais);
- D_j = Distância entre a fazenda e o frigorífico pela rota *j* (em quilômetros);
- RE_j = Estimativa dos redutores de peso (por quilômetro) para a rota *j* (em %);
- CC_k = Capacidade do caminhão *k* (em cabeças de gado);
- RC_k = Estimativa dos redutores de peso (por quilômetro) para o caminhão *k* (em %);
- H_k = preço do frete do caminhão *k* (em reais);

Com estes dados em mãos, calcula-se o preço estimado (em reais) para o pagamento da cabeça de gado transportado da fazenda ao frigorífico *i* por meio da rota *j* pelo caminhão *k*:

$$P_{ijk} = G A_i - G A_i D_j (RE_j + RC_k) = G A_i (1 - D_j (RE_j + RC_k))$$

Seja y_{ijk} a variável de decisão binária definida por:

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se o gado é transportado para o frigorífico } i \text{ pela rota } j \text{ por meio do caminhão } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A variável de decisão inteira para o problema é dada por:

x_{ijk} = quantidade de cabeças enviadas para o frigorífico *i* pela rota *j* por meio do caminhão *k*

O modelo matemático de programação linear inteira para o problema está descrito em (1)-(8), a saber:

$$\text{Maximizar } f = \sum_{ijk} P_{ijk} x_{ijk} - \sum_{ijk} H_k y_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ijk} x_{ijk} = N \quad (2)$$

$$\sum_{jk} x_{ijk} \leq CF_i \quad (i = 1..F) \quad (3)$$

$$x_{ijk} \leq CC_k y_{ijk} \quad (i = 1..F, j = 1..R, k = 1..C) \quad (4)$$

$$\sum_{ij} y_{ijk} \leq 1 \quad (k = 1..C) \quad (5)$$

$$\sum_{ijk} y_{ijk} = T \quad (6)$$

$$x_{ijk} \geq 0 \text{ e inteiras} \quad (7)$$

$$y_{ijk} = 0/1 \quad (8)$$

Neste modelo, a função-objetivo (1) maximiza o lucro total auferido pelo produtor rural, descontado o preço do frete. A restrição (2) especifica o número de cabeças de gado a ser transportadas para o abate. A restrição (3) leva em consideração a capacidade de abate dos frigoríficos (em número de cabeças). A restrição (4) impede que a capacidade de transporte de cada um dos caminhões disponíveis (em número de cabeças) seja ultrapassada. A restrição (5) garante que cada caminhão disponível será utilizado no máximo uma única vez. A restrição (6) determina o número de caminhões a ser usado no transporte do gado. Para obter a solução com o número mínimo de caminhões, pode-se resolver o modelo sucessivamente com um até o número total de caminhões disponíveis. As restrições (7) e (8) estabelecem o domínio das variáveis de decisão.

6. Exemplo Ilustrativo

No exemplo ilustrativo há um lote de 60 cabeças de gado para transportar para o abate em até três frigoríficos disponíveis. Para tanto, dispõe-se de cinco caminhões com diferentes capacidades, a saber, respectivamente iguais a 12, 12, 12, 24 e 28 cabeças de gado. O peso de cada uma das cabeças de gado do lote é estimado em 15 arrobas.

A Tabela 2 disponibiliza o preço a ser pago pela arroba do gado em cada um dos três frigoríficos (em reais), a capacidade de abate dos frigoríficos (em cabeças de gado), bem como os redutores de preço por quilômetro (em %) para as quatro rotas e os cinco caminhões disponíveis são fornecidos. Notar que a fazenda dispõe de um conjunto de rotas específico até cada um dos frigoríficos: Existem quatro rotas (ou estradas) disponíveis para se efetuar o

transporte do gado da fazenda ao abatedouro, sendo duas para o frigorífico 1 (rotas 1 e 2), uma para o frigorífico 2 (rota 3) e uma para o frigorífico 3 (rota 4).

Que decisão tomar, de modo que o lucro obtido com a venda dos animais seja o maior possível?

Tabela 2: Dados.

Dados					
N	60				
G	15				
F	3				
R	4				
C	5				
T	3				
CF _i	CF ₁ = 40	CF ₂ = 40	CF ₃ = 40		
A _i	A ₁ = 120,00	A ₂ = 110,00	A ₃ = 130,00		
RE _j	RE ₁ = 0,1	RE ₂ = 0,2	RE ₃ = 0,1	RE ₄ = 0,1	
CC _k	CC ₁ = 12	CC ₂ = 12	CC ₃ = 12	CC ₄ = 24	CC ₅ = 28
RC _k	RC ₁ = 0,03	RC ₂ = 0,03	RC ₃ = 0,03	RC ₄ = 0,02	RC ₅ = 0,01
H _k	H ₁ = 500,00	H ₂ = 500,00	H ₃ = 500,00	H ₄ = 500,00	H ₅ = 500,00

Fonte: Autores.

A Tabela 3 fornece o cálculo da estimativa do preço P_{ijk} a ser pago por cabeça, se o animal for entregue no frigorífico *i*, transportado pela rota *j* por meio do caminhão *k*.

Tabela 3: Cálculo da estimativa de preço a ser pago por cabeça de gado.

	Caminhões 1, 2, 3	Caminhão 4	Caminhão 5
Frigorífico 1 pela rota 1	$P_{111} = P_{112} = P_{113} = 15 \times 120 \times (1 - 100 \times 0.0013) = 1566$	$P_{114} = 15 \times 120 \times (1 - 100 \times 0.0012) = 1584$	$P_{115} = 15 \times 120 \times (1 - 100 \times 0.0011) = 1602$
Frigorífico 1 pela rota 2	$P_{121} = P_{122} = P_{123} = 15 \times 120 \times (1 - 150 \times 0.0023) = 1179$	$P_{124} = 15 \times 120 \times (1 - 150 \times 0.0022) = 1206$	$P_{125} = (1 - 150 \times 0.0021) = 1233$
Frigorífico 2 pela rota 3	$P_{231} = P_{232} = P_{233} = 15 \times 110 \times (1 - 130 \times 0.0013) = 1371,15$	$P_{234} = 15 \times 110 \times (1 - 130 \times 0.0012) = 1392,60$	$P_{235} = 15 \times 110 \times (1 - 130 \times 0.0011) = 1414,05$
Frigorífico 3 pela rota 4	$P_{341} = P_{342} = P_{343} = 15 \times 130 \times (1 - 200 \times 0.0013) = 1443$	$P_{344} = 15 \times 130 \times (1 - 200 \times 0.0012) = 1482$	$P_{345} = 15 \times 130 \times (1 - 200 \times 0.0011) = 1521$

Fonte: Autores.

O modelo matemático correspondente é o seguinte:

$$\text{Maximizar } f = 1566x_{111} + 1566x_{112} + 1566x_{113} + 1584x_{114} + 1602x_{115} + 1179x_{121} + 1179x_{122} + 1179x_{123} + 1206x_{124} + 1233x_{125} + 1371,15x_{231} + 1371,15x_{232} + 1371,15x_{233} + 1392,6x_{234} + 1414,05x_{235} + 1443x_{341} + 1443x_{342} + 1443x_{343} + 1482x_{344} + 1521x_{345} - 500(y_{111} + y_{121} + y_{231} + y_{341} + y_{112} + y_{122} + y_{232} + y_{342} + y_{113} + y_{123} + y_{233} + y_{343} + y_{114} + y_{124} + y_{234} + y_{344} + y_{115} + y_{125} + y_{235} + y_{345})$$

Sujeito a:

$$x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{121} + x_{122} + x_{123} + x_{124} + x_{125} + x_{231} + x_{232} + x_{233} + x_{234} + x_{235} + x_{341} + x_{342} + x_{343} + x_{344} + x_{345} = 60$$

$$x_{111} + x_{112} + x_{113} + x_{114} + x_{115} + x_{121} + x_{122} + x_{123} + x_{124} + x_{125} \leq 40$$

$$\begin{aligned}
 &X_{231} + X_{232} + X_{233} + X_{234} + X_{235} \leq 40 \\
 &X_{341} + X_{342} + X_{343} + X_{344} + X_{345} \leq 40 \\
 &X_{111} \leq 12 y_{111} \\
 &X_{121} \leq 12 y_{121} \\
 &X_{231} \leq 12 y_{231} \\
 &X_{341} \leq 12 y_{341} \\
 &X_{112} \leq 12 y_{112} \\
 &X_{122} \leq 12 y_{122} \\
 &X_{232} \leq 12 y_{232} \\
 &X_{342} \leq 12 y_{342} \\
 &X_{113} \leq 12 y_{113} \\
 &X_{123} \leq 12 y_{123} \\
 &X_{233} \leq 12 y_{233} \\
 &X_{343} \leq 12 y_{343} \\
 &X_{114} \leq 24 y_{114} \\
 &X_{124} \leq 24 y_{124} \\
 &X_{234} \leq 24 y_{234} \\
 &X_{344} \leq 24 y_{344} \\
 &X_{115} \leq 28 y_{115} \\
 &X_{125} \leq 28 y_{125} \\
 &X_{235} \leq 28 y_{235} \\
 &X_{345} \leq 28 y_{345} \\
 &y_{111} + y_{121} + y_{231} + y_{341} \leq 1 \\
 &y_{112} + y_{122} + y_{232} + y_{342} \leq 1 \\
 &y_{113} + y_{123} + y_{233} + y_{343} \leq 1 \\
 &y_{114} + y_{124} + y_{234} + y_{344} \leq 1 \\
 &y_{115} + y_{125} + y_{235} + y_{345} \leq 1 \\
 &y_{111} + y_{121} + y_{231} + y_{341} + y_{112} + y_{122} + y_{232} + y_{342} + y_{113} + y_{123} + y_{233} + y_{343} + y_{114} + y_{124} + y_{234} + \\
 &y_{344} + y_{115} + y_{125} + y_{235} + y_{345} = 3 \\
 &x_{ijk} \geq 0 \text{ e inteiras} \quad y_{ijk} = 0/1
 \end{aligned}$$

Os resultados obtidos pelo *software* LINGO são: $x_{111} = 12, x_{114} = 24, x_{345} = 24, f =$ R\$ 91.812,00.

7. Testes

Testes computacionais com o modelo matemático proposto foram realizados para 22 problemas de embarque de cabeças de gado aos frigoríficos. Em todos os testes, o número de frigoríficos, o número de rotas (ou estradas) e o número de caminhões disponíveis foram respectivamente iguais a 3, 4 e 5. Os demais dados utilizados relativos ao preço da arroba, as estradas, os caminhões, os redutores de preço e o valor do frete foram os mesmos empregados no exemplo ilustrativo da seção anterior.

A Tabela 4 fornece os dados mais importantes sobre os testes realizados (valores de N e T), bem como os resultados obtidos, com o valor da função-objetivo obtido manualmente (solução manual), o valor da função-objetivo obtido por meio do modelo matemático proposto (solução atual) e a melhoria alcançada (em %). Também são apresentados os valores das variáveis, que indicam quais frigoríficos, rotas e caminhões serão efetivamente utilizados para o transporte do gado.

Os dados para os testes computacionais foram fornecidos pela Fazenda X, localizada a aproximadamente 60 km de estrada de terra da cidade de Aquidauana, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. O valor da estimativa para os redutores de peso dos caminhões e das estradas foram fornecidos pelos técnicos da Fazenda X, com base em sua experiência e conhecimento prático.

Existem três frigoríficos na região: (1) Buriti, com capacidade para abater 350 cabeças de gado por dia; (2) JBS Anastácio, com capacidade para abater 800 cabeças por dia; e (3) Dois Irmãos do Buriti, com capacidade para abater 93 cabeças por dia. A Figura 2 mostra a planilha, com os dados referentes aos bois e o histórico registrado da perda de peso dos animais em embarques anteriores, bem como o mapa com a região da fazenda, a localização dos frigoríficos e as estradas disponíveis. Existe um quarto frigorífico em construção na região, na cidade de Miranda, Mato Grosso do Sul, a ser inaugurado em breve.

A Fazenda X possui aproximadamente 20 mil hectares e produz em torno de 2.000 bois gordos por ano. Pode-se estimar que a região tem 57 fazendas deste porte, com capacidade para produzir, pelo menos, 114 mil bois gordos por ano. Os três frigoríficos juntos possuem capacidade para abater de 450 a 520 mil cabeças de gado por ano. A região da Fazenda X, num raio de 62 quilômetros, apresenta área aproximada de 11.412 quilômetros quadrados, ou aproximadamente 1.141.200 hectares.

Os testes realizados forneceram resultado igual ou superior àqueles obtidos anteriormente pelos técnicos da fazenda, que utilizaram a prática e a experiência deles na área, o conhecimento que têm das estradas da região e os métodos tradicionais (manuais) de decisão. Em 16 testes realizados, o modelo proposto encontrou uma solução com previsão de maior rentabilidade para a venda. Esta melhoria chegou a atingir 25,2% num dos testes realizados.

Nas soluções obtidas manualmente optou-se, com frequência, pela combinação do caminhão 5, com capacidade para o transporte de 28 animais, com a estrada 2 e o frigorífico 1, que não se revelou ser a melhor opção. Nos testes utilizando um único caminhão, as duas soluções optaram pela combinação do caminhão 5, com a estrada 1 e o frigorífico 1, que é a solução ótima. No teste 7 a solução manual e atual encontrada foi a mesma e, assim, a previsão de lucro obtida pela solução manual nesse teste foi maior que a previsão esperada pela solução manual obtida nos testes 3, 4, 5 e 6, apesar de efetuar o embarque de uma quantidade inferior de gado. O mesmo ocorreu com a solução do teste 18, com previsão de lucro superior à dos testes 15, 16 e 17.

Os técnicos da Fazenda X costumam definir a solução para o problema rapidamente, com base em decisões anteriores tradicionalmente adotadas por meio da experiência prática, e conhecimento do equipamento e da geografia. Nos testes realizados com o modelo matemático proposto resolvido pelo *software* LINGO o tempo computacional exigido para a resolução de todos os problemas gerados sempre foi inferior a 1 segundo, o que mostra a rapidez da ferramenta de cálculo.

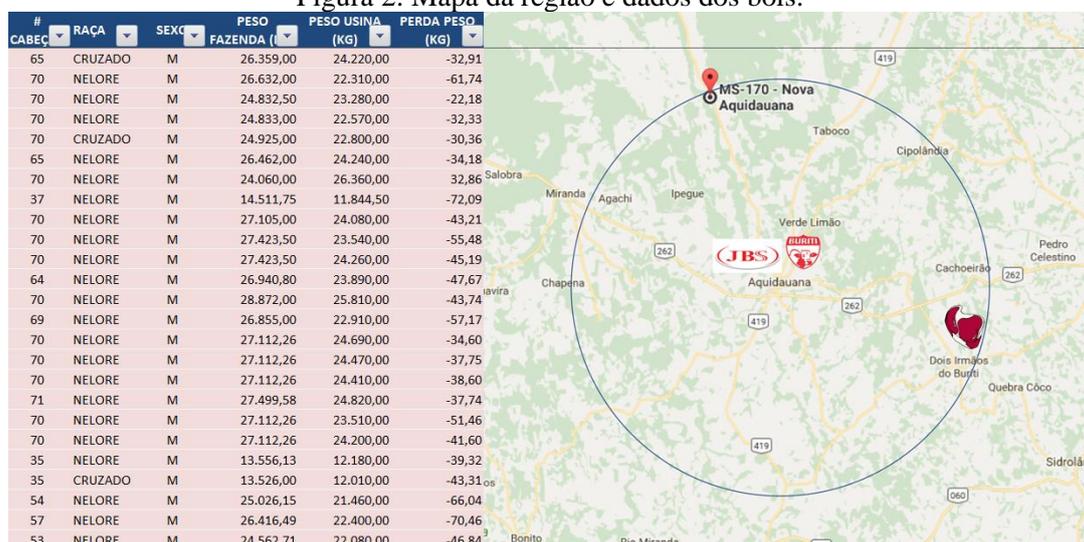
Tabela 4: Testes computacionais.

Teste	N	T	Solução Manual		Solução Atual		Melhoria %
			Função-Objetivo	Variáveis	Função-Objetivo	Variáveis	
1	86	5	113.989,4	$x_{125} = 28, x_{231} = 12,$ $x_{232} = 12, x_{233} = 12,$ $x_{344} = 22$	127.923,5	$x_{111} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{233} = 10, x_{342} = 12,$ $x_{345} = 28$	12,2
2	84	5	111.025,4	$x_{125} = 28, x_{231} = 12,$ $x_{232} = 12, x_{233} = 12,$ $x_{344} = 20$	125.181,2	$x_{112} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{233} = 8, x_{341} = 12,$ $x_{345} = 28$	12,8
3	80	5	105.097,4	$x_{125} = 28, x_{231} = 12,$ $x_{232} = 12, x_{233} = 12,$ $x_{344} = 16$	120.476	$x_{111} = 12, x_{113} = 4,$ $x_{114} = 24, x_{342} = 12,$ $x_{345} = 28$	14,6
4	78	5	102.133,4	$x_{125} = 28, x_{231} = 12,$ $x_{232} = 12, x_{233} = 12,$ $x_{344} = 14$	117.590	$x_{111} = 12, x_{113} = 4,$ $x_{114} = 24, x_{343} = 10,$ $x_{345} = 28$	15,1
5	75	4	99.628,45	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 12, x_{232} = 11$	113.269	$x_{112} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{341} = 11, x_{345} = 28$	13,7
6	72	4	95.515	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 12, x_{232} = 8$	108.940	$x_{112} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{343} = 8, x_{345} = 28$	14,1
7	70	4	106.054	$x_{112} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{341} = 6, x_{345} = 28$	106.054	$x_{112} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{341} = 6, x_{345} = 28$	0

8	67	4	88.659,25	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 12, x_{232} = 3$	102.139	$x_{111} = 4, x_{112} = 12,$ $x_{114} = 24, x_{345} = 27$	15,2
9	65	4	86.916,95	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 12, x_{232} = 1$	99.097	$x_{111} = 4, x_{112} = 12,$ $x_{114} = 24, x_{345} = 25$	16,7
10	60	3	79.561,2	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 8$	91.812	$x_{111} = 12, x_{114} = 24,$ $x_{345} = 24$	15,4
11	58	3	76.818,9	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 6$	88.824	$x_{111} = 12, x_{115} = 28,$ $x_{344} = 18$	15,7
12	54	3	71.334,3	$x_{125} = 28, x_{344} = 24,$ $x_{231} = 2$	82.896	$x_{111} = 12, x_{115} = 28,$ $x_{344} = 14$	16,2
13	52	2	69.092	$x_{125} = 28, x_{344} = 24$	79.604	$x_{114} = 24, x_{345} = 28$	15,2
14	47	2	61.682	$x_{125} = 28, x_{344} = 19$	72.014	$x_{115} = 28, x_{344} = 19$	16,8
15	40	2	51.308	$x_{125} = 28, x_{344} = 12$	62.864	$x_{114} = 12, x_{115} = 28$	22,5
16	38	2	48.344	$x_{125} = 28, x_{344} = 10$	56.969	$x_{114} = 10, x_{115} = 28$	21,4
17	35	2	43.898	$x_{125} = 28, x_{344} = 7$	54.944	$x_{114} = 7, x_{115} = 28$	25,2
18	33	2	51.776	$x_{114} = 5, x_{115} = 28$	51.776	$x_{114} = 5, x_{115} = 28$	0
19	26	1	41.152	$x_{115} = 26$	41.152	$x_{115} = 26$	0
20	20	1	31.540	$x_{115} = 20$	31.540	$x_{115} = 20$	0
21	19	1	29.938	$x_{115} = 19$	29.938	$x_{115} = 19$	0
22	12	1	18.724	$x_{115} = 12$	18.724	$x_{115} = 12$	0

Fonte: Autores.

Figura 2: Mapa da região e dados dos bois.



Fonte: Autores.

8. Conclusão

Neste artigo é apresentado um modelo matemático linear em variáveis inteiras para auxiliar o produtor rural, criador de cabeças de gado de corte, no processo de decisão relacionado à escolha do frigorífico onde será efetuada a venda dos animais, da rota por onde o gado será transportado e do caminhão por meio do qual os animais serão embarcados para o abate. O modelo proposto foi testado sobre 22 problemas de embarque, com dados fornecidos pela Fazenda X, localizada na cidade de Aquidauana, Mato Grosso do Sul, Brasil. No exemplo ilustrativo apresentado, o modelo proposto foi utilizado para auxiliar na venda de 60 cabeças de gado para um conjunto de três frigoríficos, utilizando 5 caminhões e 4 combinações diferentes de estradas para efetuar o transporte.

A principal contribuição deste trabalho para a pesquisa na área consiste na proposição de um modelo matemático original para a resolução do problema. A resolução do modelo foi realizada pela versão gratuita do *software* LINGO, desenvolvido pela LINDO Systems. Todos os testes realizados forneceram resultados em tempo de cálculo sempre inferior a 1 segundo. O *software* LINGO foi escolhido para o desenvolvimento do trabalho por duas razões fundamentais: (i) por ter uma versão gratuita e ser capaz de obter rapidamente a solução ótima do problema (método *branch-and-bound*), e (ii) com o objetivo de conferir simplicidade à resolução, maior acessibilidade e popularidade junto aos usuários, técnicos e tomadores de decisão.

O trabalho pode ter continuidade em várias direções: (1) realização de novos testes computacionais sobre novas bases de dados mais amplas e complexas; (2) estudo do embarque do gado a partir de múltiplas origens (fazendas) para múltiplos destinos (frigoríficos); (3) introdução da alternativa de múltiplas viagens por caminhão; (4) inclusão da possibilidade de venda multiperíodo (ou seja, adicionar a decisão de quando é mais vantajoso para o fazendeiro realizar a venda para frigorífico); e (5) introdução da probabilidade de perdas maiores para a carga transportada, tais como quebras de caminhão e acidentes.

Finalmente, pretende-se desenvolver um programa computacional para resolver o modelo proposto capaz de resolver problemas de grande dimensão, com base na plataforma *OpenSolver for Excel* (Mason, 2012), uma versão gratuita do *Microsoft-Excel-Solver* disponibilizada na internet (<http://opensolver.org/>) para resolução de problemas de otimização de grande porte.

Agradecimentos. Agradecimentos aos revisores pelo auxílio na redação final do artigo.

Referências

ABIEC - Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. *Exportações Brasileiras de Carne Bovina – Brazilian Beef Exports*. 2017. 19p. Disponível em: <http://abiec.com.br/download/Anual-jan-dez-2017.pdf>. Acesso em: 26/04/2017.

Andrade, E. N., Silva, R. A. M. S., Roça, R. O., Silva, L. A. C., Gonçalves, H. C. e Pinheiro, R. S. B. Ocorrência de lesões em carcaças de bovinos de corte no Pantanal em função do transporte. *Ciência Rural*, v. 38, n. 7, p. 1991-1996, 2008.

Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R. e Yanasse, H. *Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier-Campus, 2007.

Azi, N., Gendreau, M. e Potvin, J.-Y. A dynamic vehicle routing problem with multiple delivery routes. *Annals of Operations Research*, v. 199, n. 1, p. 103-112, 2012.

Barnes, K., Smith, S. e Lalman, D. *Managing shrink and weighing conditions in beef cattle*. 2007. Oklahoma Cooperative Extension Service, ANSI-3257, Oklahoma State University. Disponível em: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Rendition-7449/ANSI-3257web.pdf>. Acesso em: 21/04/2017.

BEEFPOINT. *Perfil da Pecuária no Brasil - Relatório Anual 2016*. 2016. Disponível em: <http://www.beefpoint.com.br/cadeia-produtiva/giro-do-boi/perfil-da-pecuaria-no-brasil-relatorio-anual-2016>. Acesso em: 21/04/2017.

Braggion, M. e Silva, R. A. M. S. *Quantificação de lesões em carcaças de bovinos abatidos em frigoríficos no pantanal Sul-Mato-Grossense*. Relatório Técnico 45, Embrapa Pantanal. 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/79539/1/COT45.pdf>. Acesso em: 21/04/2017.

Clarke, G. e Wright, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

CNT - Pesquisa CNT de Rodovias, 2016. Disponível em: <http://www.pesquisarodoviascms.cnt.org.br>. Acesso em: 26/04/2017.

Crevier, B., Cordeau, J.-F. e Laporte, G. The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, v. 176, n. 2, p. 756-773, 2007.

Dantzig, G. B. e Ramser, J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

De Jaegere, N., Defraeye, M. e Van Nieuwenhuysse, I. *The vehicle routing problem: State of the art classification and review*. 2014. Relatório Técnico KU Leuven Faculty of Economics and Business, 32 p. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/457452/1/>. Acesso em: 26/03/2018.

Eksioglu, B., Vural, A. V. e Reisman, A. The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, v. 57, n. 4, p. 1472-1483, 2009.

FORBES. *15 países que mais consomem carne no mundo*. 2015. Disponível em: <http://www.forbes.com.br/listas/2015/08/15-paises-que-mais-consosem-carne-no-mundo/#foto6>. Acesso em: 26/04/2017.

Frisk, M., Jonsson, A., Sellman, S., Flisberg, P., Rönnqvist, M. e Wennergren, U. Route optimization as an instrument to improve animal welfare and economics in pre-slaughter logistics. *PLoS ONE*, v. 13, n. 3, p. e0193223, 2018.

Gendreau, M., Guertin, F., Potvin, J.-Y. e Séguin, R. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 14, n. 3, p. 157-174, 2006.

Grandin, T. *Livestock handling and transport*, Cambridge, MA: CAB International, 3rd Edition, 2007.

Gray, M. E. e Welby, E. M. *A business of details - Exporting high value U.S. agricultural products*. USDA - United States Department of Agriculture - Agricultural Marketing Service Transportation and Marketing Division, 1997.

Gribovskaia, I., Gullberg, B. O., Hovden, K. J. e Wallace, S. W. Optimization model for a livestock collection problem. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, v. 36, n. 2, p.136-152, 2006.

Gutiérrez-Jarpa, G., Desaulniers, G., Laporte, G. e Marianov, V. A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with deliveries, selective pickups and time windows. *European Journal of Operational Research*, v. 206, n. 2, p. 341-349, 2010.

Higgins, A., McFallan, S., Laredo, L., Prestwidge, D. e Stone, P. TRANSIT - A model for simulating infrastructure and policy interventions in agriculture logistics: Application to the northern Australia beef industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 114, p. 32-42, 2015.

Jepsen, M., Spoorendonk, S. e Ropke, S. A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, v. 47, n. 1, p. 23-37, 2013.

- King, G. A. e Logan, S. H. Optimum location, number and size of processing plants with raw product and final product shipments. *American Journal of Agricultural Economics*, v. 46, n. 1, p. 94-108, 1964.
- Krajewska, M. A. e Kopfer, H. Transportation planning in freight forwarding companies: Tabu search algorithm for the integrated operational transportation planning problem. *European Journal of Operational Research*, v. 197, n. 2, p. 741-751, 2009.
- Kumar, S. N. e Panneerselvam, R. A survey on the vehicle routing problem and its variants. *Intelligent Information Management*, v. 4, p. 66-74, 2012.
- Laporte, G. Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.
- Lenstra, J. K. e Rinnooy Kan, A. H. G. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, v. 11, n. 2, p. 221-227, 1981.
- Ljungberg, D., Gebresenbet, G. e Aradom, S. Logistics chain of animal transport and abattoir operations. *Biosystems Engineering*, v. 96, n. 2, p. 267-277, 2007.
- Lucas, M. T. e Chhajed, D. Applications of location analysis in agriculture: a survey. *Journal of the Operational Research Society*, v. 55, n. 6, p. 561-578, 2004.
- Mason, A. J. OpenSolver - An open source add-in to solve linear and integer programmes in Excel. *Operations Research Proceedings 2011*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. p. 401-406.
- Mendonça, F. S., Vaz, R. Z., Cardoso, F. F., Restle, J., Vaz, F. N., Pascoal, L. L., Reimann, F. A. e Boligon, A. A. Pre-slaughtering factors related to bruises on cattle carcasses. *Animal Production Science*, v. 58, n. 2, p. 385-392, 2016.
- Mingozzi, A., Roberti, R. e Toth, P. An exact algorithm for the multitrip vehicle routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, v. 25, n. 2, p. 193-207, 2013.
- Miranda-de la Lama, G. C., Villarroel, M. e María, G. A. Livestock transport from the perspective of the pre-slaughter logistic chain: a review. *Meat Science*, v. 98, n. 1, p. 9-20, 2014.
- Oppen, J. The Livestock Collection Problem - a real-world vehicle routing and inventory problem. *AENORM 61*, v. 16, p. 31-33, 2008.
- Oppen, J. e Løkketangen, A. A tabu search approach for the livestock collection problem. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 10, p. 3213-3229, 2008.
- Oppen, J., Løkketangen, A. e Desrosiers, J. Solving a rich vehicle routing and inventory problem using column generation. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 7, p. 1308-1317, 2010.
- Paranhos da Costa, M. J. R., Zuin, L. F. S. e Piovesan, U. *Avaliação preliminar do manejo pré-abate de bovinos no programa de qualidade da carne bovina do Fundeppec*. Relatório Técnico CNPq-UNESP Jaboticabal, 21 p., 1998.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C. e Medaglia, A. L. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 225, n. 1, p. 1-11, 2013.

Rocha, C. F. *O transporte de cargas no Brasil e sua importância para a economia*. 71 f. TCC (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Departamento de Ciências Administrativas, Contábeis, Econômicas e da Comunicação, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí-RS, 2015.

Schwartzkopf-Genswein, K. S., Faucitano, L., Dadgar, S., Shand, P., González, L. A. e Crowe, T. G. Road transport of cattle, swine and poultry in North America and its impact on animal welfare, carcass and meat quality: a review. *Meat Science*, v. 92, n. 3, p. 227-243, 2012.

Sigurd, M., Pisinger, D. e Sig, M. Scheduling transportation of live animals to avoid the spread of diseases. *Transportation Science*, v. 38, n. 2, p. 197-209, 2004.

Tarrant, P. V. e Grandin, T. Cattle transport. In: Grandin, T. (Ed.), *Livestock handling and transport*. Oxford: CAB International, p. 109-126, 2000.

Toth, P. e Vigo, D. An overview of vehicle routing problems. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, p.1-26, 2002.

USDA - United States Department of Agriculture. Agricultural Projections to 2026, *Report Interagency Agricultural Projections Committee USDA Long-term Projections*, 100 p., 2017.

Vernieuwe, H., Ducheyne, E., Hendrickx, G. e De Baets, B. Efficient management of transportation logistics related to animal disease outbreaks. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 71, n. 2, p. 148-157, 2010.

Zucchi, J. D., Zeng, A. Z. e Caixeta-Filho, J. V. Optimum location for export-oriented slaughterhouses in Mato Grosso, Brazil: A dynamic mathematical model. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 14, n. 3, p. 135-148, 2011.