

# MODELO MATEMÁTICO APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE DIETA PARA BOVINOS DE CORTE EM SISTEMA DE PASTEJO

Gustavo Henrique Pedroso Santos<sup>1</sup>  
Tiago Sokulski Teixeira<sup>2</sup>  
Thiago André Guimarães<sup>3</sup>

## RESUMO

O objetivo do estudo foi formular um modelo matemático para a otimização de dietas visando minimizar o custo com a alimentação dos bovinos de uma propriedade rural no Estado do Paraná. Foram utilizados dados reais da propriedade e dados coletados da literatura. Foram calculadas as exigências nutricionais diárias de proteína, energia, cálcio, fósforo, sódio, magnésio e potássio para bovinos castrados da raça Nelore, para faixas de peso de 150, 200, 250, 300 e 350 kg. Para cada faixa de peso (FP), calcularam-se as necessidades dos nutrientes citados para manutenção e para ganhos de peso diário (GPD) de 0,5, 1,0 e 1,5 kg. Calculou-se os custos de alimentação com base em dados reais de aquisição e preparo dos alimentos na propriedade. Para todas as FP, houve um aumento nos custos com a elevação do GPD. No verão, o custo com alimentação foi menor do que no inverno, e o consumo de concentrado foi igual nos dois períodos. A brachiaria brizantha não foi consumida em nenhum momento, significando que, nas condições propostas, o capim jaraguá foi a melhor opção para todos os cenários. O custo médio diário da dieta foi de R\$ 1,68 por cabeça, e as maiores variações nos custos foram registradas para ganhos de peso diário de 1,5 kg. Conclui-se que o modelo pode ser aplicado à propriedade, podendo servir como base para outros estudos na área de Pesquisa Operacional. Entretanto, são necessárias adequações que sejam condizentes com as particularidades de cada sistema produtivo e de cada propriedade rural.

Palavras-chave: Bovinocultura de Corte. Custo de Produção. Modelagem Matemática. Otimização de Dieta. Pesquisa Operacional.

<sup>1</sup> Especialista em Gestão do Agronegócio pela UFPR. Graduado em Zootecnia pela UFPR.

Graduando em Ciências Econômicas pela FAE Centro Universitário. *E-mail*: gushps@hotmail.com

<sup>2</sup> Graduando em Ciências Econômicas pela FAE Centro Universitário. *E-mail*: tiagosokulski@gmail.com

<sup>3</sup> Doutor em Métodos Numéricos em Engenharia pela UFPR. Professor da FAE Centro Universitário. *E-mail*: thiago.guimaraes@fae.edu

## INTRODUÇÃO

A bovinocultura de corte é realizada em todos os estados do Brasil e figura como importante atividade econômica no PIB brasileiro (EUCLIDES FILHO; EUCLIDES, 2010). A busca pela elaboração e aplicação de ferramentas que visem reduzir custos e/ou maximizar o lucro da atividade é uma alternativa de suma importância, de modo a servir como um balizador na tomada de decisão, auxiliando o produtor a realizar as melhores escolhas de produção e comercialização.

Nos últimos anos, a rentabilidade da pecuária de corte vem perdendo atratividade face, entre outros fatores, à queda de desempenho em relação à produção de culturas agrícolas, como a soja, o milho e a cana-de-açúcar. Os novos padrões de produção de gado de corte, associados a mercados cada vez mais competitivos, levaram a um incremento nos custos de produção (SIMÕES; MOURA; ROCHA, 2006). Segundo Damasceno, Lopes e Costa (2012), a redução dos custos de produção constitui-se em uma das principais formas de elevar a rentabilidade na produção de gado de corte, já que o produtor rural é o agente tomador de preços na cadeia de produção pecuária bovina.

Santos, Rodrigues e Lisboa Filho (2006) e Coutinho e Silva (2013) afirmam que a alimentação dos animais é um fator crítico dos custos de produção, representando a maior parcela dos gastos, variando de 50% a 75% dos custos totais, com grande impacto sobre a rentabilidade da criação de ruminantes. Assim, a obtenção de maior eficiência no manejo alimentar dos animais tem o potencial de gerar um grande impacto econômico nos sistemas de produção de carne. Nesse sentido, conhecer as exigências nutricionais dos animais e os fatores que as afetam possibilita ao técnico adotar estratégias de manejo que resultem em maior eficiência alimentar e, concomitantemente, econômica (VALADARES FILHO; PAULINO; MAGALHÃES, 2005).

Caixeta-Filho (2011) destaca a importância da aplicação da Pesquisa Operacional (PO) neste segmento, exemplificando que os processos de modelagem normativa têm a capacidade de impor um determinado padrão, tal como um tipo de formulação de ração que pode ser relativamente mais benéfica, por exemplo, àquele grupo de alimentos que vinha sendo utilizado para a nutrição de determinado grupo de animais. Azevedo Filho e Neves (1988) ressaltam que a PO pode ser aplicada em diversos problemas na agricultura, como a otimização de dietas, planejamento de fazendas, otimização de transporte e localização espacial, análise e planejamento de experimentos, planejamentos florestais, entre outros. Por sua natureza multidisciplinar, Dossa (1994) afirma que a PO tem a capacidade de determinar decisões ótimas em vários aspectos. O autor resalta que, ao modelar a fazenda, pode-se observá-la do ponto de vista matemático, facilitando a criação de simulações que apontem os possíveis resultados.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho é formular um modelo matemático para a otimização de dieta, visando minimizar o custo com a alimentação dos bovinos de uma propriedade rural que desenvolve a atividade de bovinocultura de corte no Estado do Paraná.

## 1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A fazenda utilizada como modelo para a elaboração deste trabalho está localizada no município de Santo Antônio da Platina, na mesorregião geográfica do Norte Pioneiro Paranaense. A propriedade atua nas fases de recria e engorda de bovinos da raça Nelore, em sistema de pastejo rotacionado. A área útil total é de 278,82 hectares (ha), dos quais 268,23 ha correspondem às áreas de pastagem e 10,59 ha à agricultura.

A fonte de dados utilizada é a de registros administrativos reais, coletados do banco de dados próprio da fazenda, que contempla uma série histórica de mais de cinco anos e possui dados quantitativos (insumos, custo da mão de obra, energia elétrica, combustível etc.) e qualitativos, tais como as descrições da propriedade, do sistema de criação e do processo produtivo. Foram utilizadas também informações contidas na literatura nacional e internacional a respeito do tema, sobretudo no que se refere a estudos relacionados às áreas de pesquisa operacional e de nutrição animal de bovinos de corte.

Durante a primavera e o verão, entre os meses de setembro e fevereiro, os animais são alimentados apenas à base de pastagem. Entretanto, durante o outono e o inverno, período compreendido entre os meses de março e agosto, além da forragem, os animais recebem uma suplementação concentrada, como forma de compensação pela redução da qualidade nutricional da pastagem que ocorre neste período, devido, principalmente, à queda expressiva na precipitação pluviométrica nesta época do ano, visando à manutenção e/ou o ganho de peso dos animais. Este alimento concentrado é produzido na fábrica de ração da própria fazenda, após a compra dos insumos que serão utilizados. Ao atingirem o peso corporal de 350 kg, os animais são enviados para o confinamento, onde passam a receber então uma suplementação à base de alimentos concentrados e volumosos (silagem de cana e/ou milho), especialmente desenvolvida para acelerar a terminação de ganho de peso e de acabamento de gordura dos animais nesta fase.

Para efeito de cálculo do modelo e devido às semelhanças na composição da pastagem, as variáveis que representam as estações do ano foram divididas em **verão** e **inverno**. A primeira corresponde ao conjunto das estações primavera-verão, enquanto a segunda refere-se ao conjunto outono-inverno das estações do ano. A esta divisão também se dá o nome, usualmente, de estação das águas e estação seca, respectivamente.

A composição nutricional das duas espécies de pastagem presentes na propriedade foi obtida nas obras de Valadares Filho, Rocha Jr. e Capelle (2002) e Velloso, Strazzacappa e Procknor (1982). Já a composição do alimento concentrado fornecido aos animais na propriedade foi retirada do programa de formulação de dietas RLM - Ração de Lucro Máximo® (Versão 3.2).

## 1.1 CÁLCULO DAS EXIGÊNCIAS NUTRICIONAIS

Para a elaboração do modelo foram calculadas as exigências nutricionais de animais castrados da raça Nelore para proteína (P), energia líquida (EL), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg), sódio (Na) e potássio (K). Os cálculos foram feitos para faixas de peso vivo (PV) de 150 kg, 200 kg, 250 kg, 300 kg e 350 kg. Para cada uma das faixas de peso vivo foram calculadas exigências diárias de manutenção, isto é, para ganho de peso diário de 0,0 kg, e para ganhos de peso diário (GPD) de 0,5 kg, 1,0 kg e 1,5 kg.

O QUADRO 1 apresenta as equações utilizadas para o cálculo das exigências para manutenção e para ganho dos nutrientes e minerais considerados.

QUADRO 1 – Equações utilizadas para a determinação das exigências nutricionais de bovinos de corte

Nutriente / Mineral	Condição	Equação
Proteína	Mantença	$3,8 \text{ g/kg de PV}^{0,75}$
	Ganho	$\text{GPVj} * (268 - 29,4 * \text{ELg} / \text{GPVj})$
Energia Líquida	Mantença	$77 \text{ kcal} / \text{PCVZ}^{0,75}$
	Ganho	$0,0635 * \text{PCVZ}^{0,75} * \text{GPCVZ}^{1,097}$
Cálcio (Ca)	Mantença	$15,4 \text{ mg} / \text{kg}$
	Ganho	$\text{GPCVZ} * 102 * \text{PCVZeq}^{-0,40} / 0,55$
Fósforo (P)	Mantença	$17,6 \text{ mg} / \text{kg de PC}$
	Ganho	$\text{GPCVZ} * 29,8 * \text{PCVZeq}^{-0,29} / 0,68$
Magnésio (Mg)	Mantença	$3,3 \text{ mg} / \text{kg de PCVZ}$
	Ganho	$333,3 * \text{GPCVZ} / 0,16$
Sódio (Na)	Mantença	$7,0 \text{ mg} / \text{kg de PCVZ}$
	Ganho	$1,5243 * \text{GPCVZ} / 0,91$
Potássio (K)	Mantença	Fecal = $2,6 \text{ g} / \text{kg CMS}$
		Urinária = $37,5 \text{ mg} / \text{kg PC}$
		Salivar = $0,7 \text{ g} / 100 \text{ kg de PC}$
		Pele = $0,7 + 0,002 * \text{PC}$
	Ganho	$\text{GPCVZ} * 0,29 * \text{PCVZeq}^{0,38}$

FONTE: NRC (1996), Garret (1980) e Gionbelli et al. (2010)

As siglas contidas nas equações do QUADRO 1 correspondem às seguintes descrições:

- PV = peso vivo do animal;
- GPVj = ganho de peso vivo em jejum;
- ELg = energia líquida para ganho de peso;
- PCVZ = peso vivo de abate do animal, excluindo-se o peso do conteúdo gastrointestinal, medida esta que é mais precisa do que o PV;
- GPCVZ = ganho de peso corporal vazio;
- PCVZeq = peso corporal vazio equivalente, que corrige animais em estágios de maturidade diferentes para uma mesma maturidade;
- CMS = consumo de matéria seca;
- PC = peso corporal.

A relação PCVZ / PV utilizada foi a encontrada por Lage (2011), em que PCVZ = 96% do PV. Adotou-se também o valor de 0,9628, predito por Silva et al. (2002), para se chegar no cálculo da relação entre o ganho de peso de corpo vazio (GPCVZ) e o ganho de peso vivo em jejum (GPVj).

A TAB. 1 apresenta as exigências diárias de proteína e de energia dos animais.

TABELA 1 – Exigências líquidas diárias de proteína, em gramas (g), e de energia, em megacalorias (Mcal), de animais Nelore para diferentes FP e diferentes GPD

		PVj									
GVPj	GPCVZ	150		200		250		300		350	
		PCVZ									
		144		192		240		288		336	
		P <sup>(1)</sup>	E <sup>(2)</sup>	P	E	P	E	P	E	P	E
0	0	162,87	1,85	202,10	1,49	238,91	1,26	273,92	1,10	307,49	0,98
0,5	0,48	187,80	3,04	249,02	2,96	284,74	3,00	317,01	3,09	346,94	3,22
1	0,96	282,16	4,38	333,83	4,63	360,59	4,98	384,34	5,36	406,10	5,76
1,5	1,44	374,45	5,80	416,09	6,39	433,42	7,06	448,21	7,75	461,37	8,44

NOTA: <sup>(1)</sup> Proteína e <sup>(2)</sup> Energia

FONTE: Os autores (2014)

As necessidades diárias dos minerais cálcio (Ca), fósforo (P), potássio (K), magnésio (Mg) e sódio (Na) estão descritas nas TAB. 2 e TAB. 3.

Na TAB. 2 é possível verificar a quantidade diária de cálcio necessária para animais de 150 kg a 350 kg de peso vivo, para manutenção e para ganhos de peso variando de 0,0 kg a 1,5 kg por dia.

TABELA 2 – Exigências diárias de cálcio (Ca) e fósforo (P), em gramas (g), para manutenção e para diferentes GPD, de bovinos Nelore, em cinco FP

		PVj									
GPVj	GPCVZ	150		200		250		300		350	
		PCVZ									
		144		192		240		288		336	
		Ca	P	Ca	P	Ca	P	Ca	P	Ca	P
0	0	4,20	3,88	5,60	5,18	3,85	6,47	4,62	7,76	5,39	9,06
0,5	0,48	16,68	8,95	16,73	9,84	17,18	10,84	17,86	11,91	18,70	13,02
1	0,96	29,17	14,02	27,85	14,50	27,35	15,21	27,32	16,05	27,59	16,99
1,5	1,44	41,65	19,08	38,98	19,16	37,53	19,58	36,78	20,20	36,49	20,95

FONTE: Os autores (2014)

A TAB. 3 descreve as quantidades diárias de sódio, magnésio e potássio necessárias para a manutenção e para diferentes ganhos de peso de animais Nelore entre os 150 kg e 350 kg de peso vivo.

TABELA 3 – Exigências diárias de sódio (Na), magnésio (Mg) e potássio (K), em gramas (g), para manutenção e para diferentes GPD, de bovinos Nelore, em cinco FP

		PVj														
GPVj	GPCVZ	150			200			250			288			350		
		PCVZ														
		144			192			240			300			336		
		Na	Mg	K	Na	Mg	K	Na	Mg	K	Na	Mg	K	Na	Mg	K
0	0	1,03	2,76	15,23	1,37	3,68	19,91	1,37	4,59	24,60	2,06	5,51	29,28	2,40	6,43	33,97
0,5	0,48	1,83	3,76	20,32	2,18	4,68	26,14	2,18	5,60	31,65	2,52	6,52	37,47	3,21	7,43	43,29
1	0,96	2,64	4,76	26,02	2,98	5,68	33,03	2,98	6,60	40,36	3,33	7,52	47,37	4,01	8,44	54,37
1,5	1,44	3,45	5,76	31,85	3,79	6,68	40,31	3,79	7,60	48,77	4,13	8,52	57,22	4,82	9,44	65,34

FONTE: Os autores (2014)

## 1.2 CÁLCULO DOS CUSTOS DE PRODUÇÃO

Para o cálculo do custo do alimento concentrado foram considerados os valores, em reais por tonelada, dispendidos pela propriedade para aquisição das matérias-primas nos últimos quatro anos (2010 a 2014). Para se chegar ao preço médio, os valores coletados foram deflacionados pelo Índice Geral de Preços – Disponibilidade Interna (IGP-DI) da Fundação Getúlio Vargas (FGV), com base em outubro de 2014. A TAB. 4 apresenta o custo médio do alimento concentrado.

TABELA 4 – Custo médio dos insumos utilizados na fabricação do alimento concentrado, de 2010 a 2014

Ingrediente	Proporção (%MS)	Proporção (%MO)	Custo (R\$/MS)	Custo (R\$/MO)	Custo (R\$/ton MS)	Custo (R\$/ton MO)
NaCl <sup>(1)</sup>	13,39	12,40	329,56	329,56	42,84	39,67
FS 45% <sup>(2)</sup>	23,17	24,11	948,88	844,50	213,49	197,71
Milho grão	19,71	20,75	386,21	339,86	73,92	68,46
Triguilho	13,76	14,31	352,94	314,11	47,144	43,65
Ureia	18,02	16,86	1664,45	1647,81	291,27	269,74
Sal mineral	14,93	14,56	1875,47	1781,70	271,94	251,84
Total	102,99	102,99	5557,51	5257,55	940,64	871,10

NOTA: Dados reais obtidos da propriedade: (1) Cloreto de Sódio (NaCl) e (2) Farelo de Soja com 45% de proteína bruta.

FONTE: Os autores (2014)

Para o cálculo do custo da pastagem, foram considerados os valores gastos com o objetivo de elevar a produtividade de cada ciclo produtivo entre os anos de 2009 e 2013, ou seja, os custos dispendidos para acelerar o ganho de peso dos animais. Durante este período foram realizadas apenas operações de manutenção e limpeza das áreas de pasto. Portanto, o custo considerado da pastagem originou-se dos gastos com produtos utilizados no combate a plantas invasoras, combustível (diesel) das máquinas de aplicação e mão de obra. Até a finalização deste estudo, não houve, no ano de 2014, nenhum gasto relacionado à pastagem. Na média do período, o custo com manutenção e limpeza das áreas de pasto foi de R\$ 474.342,77.

A partir dos dados obtidos da propriedade, calculou-se a média de produção de matéria seca das pastagens, em kg/ha, para os períodos de verão (setembro a fevereiro) e inverno (março a agosto). No total, produz-se por ano, em média, 5.700 kg de MS/ha, sendo que, apenas no verão, a produção chega a 4.335,2 kg de MS/ha, restando ao inverno a produção de 1.364,8 kg de MS/ha.

Para o custo da pastagem, calculou-se uma média anual do custo da manutenção da fazenda, por hectare, e dividiu-se o valor por dois, para separar o custo entre os períodos de verão e inverno. Dividiu-se o custo semestral de manutenção da pastagem por sua produtividade, obtendo-se o custo médio por kg de pastagem, por ano e em cada período.

TABELA 5 – Preço médio da pastagem, em kg, nos períodos de verão e inverno, de 2009 a 2013

	Anual	Verão	Inverno
Custo (R\$/ha)	R\$ 353,68	R\$ 176,84	R\$ 176,84
Pastagem (Kg/ha)	5700	4335	1365
Custo/Kg	R\$ 0,06	R\$ 0,04	R\$ 0,13

NOTA: Cálculo realizado com base em dados reais obtidos da propriedade.

FONTE: Os autores (2014)

## 1.3 MODELAGEM

O modelo matemático de minimização de custo da dieta foi construído com base em conjuntos, parâmetros, variáveis, restrições e na função objetivo (FO).

### 1.3.1 Conjuntos

Os conjuntos estabelecem os cenários para os quais será realizada a otimização. Eles contemplam as faixas de peso (FP) e os ganhos de peso diários (GPD), pois para cada FP, as necessidades de consumo de matéria seca são diferentes. Além disso, apresentam também as espécies de pastagem presentes na propriedade, divididas em dois períodos (verão e inverno).

#### **Faixa de Peso (FP)**

$$FP: i = 1, \dots, 5$$

em que:

$$i = 1 - 150\text{kg}$$

$$i = 2 - 200\text{kg}$$

$$i = 3 - 250\text{kg}$$

$$i = 4 - 300\text{kg}$$

$$i = 5 - 350\text{kg}$$

A FP, representada por  $i$ , varia de 1 a 5, em que 1 refere-se ao peso de 150 kg e 5 ao peso de 350 kg, com variação de 50 kg entre as faixas.

#### **Ganho de Peso Diário (GPD)**

$$GPD: j = 1, \dots, 4$$

em que:

$$j = 1 - 0,0\text{kg} / \text{dia}$$

$$j = 2 - 0,5\text{kg} / \text{dia}$$



$$j = 3 - 1,0\text{kg / dia}$$

$$j = 4 - 1,5\text{kg / dia}$$

O GPD, representado pela letra  $j$ , varia de 1 a 4, em que 1 se refere ao ganho de peso para manutenção, ou seja, GPD = 0,0 kg, e 4 representa o GPD de 1,5 kg/dia, com faixas a cada 0,5 kg.

### **Tipo de Pastagem (TP)**

$$TP: k = 1,2$$

em que:

$$k = 1 - \text{Brachiaria - Brizantha}$$

$$k = 2 - \text{Capim - Jaraguá}$$

São dois os tipos de pastagem (TP), representados por  $k$ , em que 1 diz respeito à espécie brachiaria brizantha e 2 refere-se ao capim jaraguá.

### **Período da Pastagem (PP)**

$$PP: t = 1,2$$

em que:

$$t = 1 - \text{Verão}$$

$$t = 2 - \text{Inverno}$$

O período da pastagem (PP), representado por  $t$ , apresenta duas variantes: uma em que 1 é o verão e outra em que 2 é o inverno.

## 1.3.2 Parâmetros

- $c^k$  = Custo por kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $PB^k$  = Quantidade de proteína bruta, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $EL^k$  = Quantidade de energia líquida, em Mcal, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $Ca^k$  = Quantidade de cálcio, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $Fos^k$  = Quantidade de fósforo, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $Pot^k$  = Quantidade de potássio, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $Sod^k$  = Quantidade de sódio, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $Mag^k$  = Quantidade de magnésio, em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$ ;
- $FDN^{kt}$  = Quantidade de fibra em detergente neutro (FDN), em kg, contida em 1 kg de pastagem do tipo  $k$  no período  $t$ ;

- $c^R$  = Custo por kg de concentrado;
- $PB^R$  = Quantidade de proteína bruta, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $EL^R$  = Quantidade de energia líquida, em Mcal, contida em 1 kg de concentrado;
- $Ca^R$  = Quantidade de cálcio, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $Fos^R$  = Quantidade de fósforo, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $Pot^R$  = Quantidade de potássio, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $Sod^{kR}$  = Quantidade de sódio, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $Mag^R$  = Quantidade de magnésio, em kg, contida em 1 kg de concentrado;
- $FDN^R$  = Quantidade de FDN, em kg, contida em 1 kg de concentrado.

### 1.3.3 Variáveis de Decisão

- $X_{ij}^{kt}$  = 1, se o bovino na faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$  se alimentar da pastagem  $k$  no período  $t$ ; e 0, caso contrário;
- $Q_{ij}^{kt}$  = Quantidade consumida de pastagem do tipo  $k$  no período  $t$ , em kg por dia, pelo bovino na faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $Q_{ij}^{Rt}$  = Quantidade consumida de concentrado no período  $t$ , em kg por dia, pelo bovino na faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ .

### 1.3.4 Restrições

As restrições do modelo são compostas pelos limitantes e pelas relações de restrição.

#### 1.3.4.1 Limitantes

- $FDN_{min-ij}$  = Quantidade mínima de FDN, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $PB_{min-ij}$  = Quantidade mínima de proteína bruta, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $EL_{min-ij}$  = Quantidade mínima de energia líquida, em Mcal por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $Cal_{min-ij}$  = Quantidade mínima de cálcio, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $Fos_{min-ij}$  = Quantidade mínima de fósforo, em kg por dia, que deve ser

- consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
- $Pot_{min-ij}$  = Quantidade mínima de potássio, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $Pot_{max-ij}$  = Quantidade máxima de potássio, em kg por dia, que pode ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $Sod_{min-ij}$  = Quantidade mínima de sódio, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $Sod_{max-ij}$  = Quantidade máxima de sódio, em kg por dia, que pode ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $Mag_{min-ij}$  = Quantidade mínima de magnésio, em kg por dia, que deve ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $Mag_{max-ij}$  = Quantidade máxima de magnésio, em kg por dia, que pode ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ ;
  - $MS_{max-ij}$  = Quantidade máxima de matéria seca, em kg por dia, que pode ser consumida pelo animal da faixa de peso  $i$  com ganho de peso  $j$ .

#### 1.3.4.2 Relações de restrição

$$FDN_{\min} = 0,15 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right], \forall i, j, t \quad (1)$$

$$MS_{max-1j} = 3,75, \forall j \quad (2)$$

$$MS_{max-3j} = 6,25, \forall j \quad (4)$$

$$MS_{max-4j} = 7,50, \forall j \quad (5)$$

$$MS_{max-5j} = 8,75, \forall j \quad (6)$$

$$Pot_{max} = 0,03 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right], \forall i, j, t \quad (7)$$

$$Mag_{max} = 0,004 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right], \forall i, j, t \quad (8)$$

É determinado que em cada período  $t$  só seja possível consumir um tipo de pastagem  $k$ . Além disso, um tipo de pastagem  $k$  do período  $t$  só pode ser consumido no seu respectivo período.

A equação (1) restringe a quantidade mínima de FDN a ser consumida. As equações (2) a (8) restringem as quantidades máximas de matéria seca (MS), potássio e magnésio a serem consumidas para cada faixa de peso.

### 1.3.5 Modelo

O modelo foi determinado pela FO, que visa minimizar o custo total da dieta. A função baseia-se na multiplicação do custo dos alimentos (concentrado e volumoso) por sua quantidade consumida. Também foram definidas as funções que deixam a FO sujeita a valores mínimos e máximos.

#### 1.3.5.1 Função objetivo (FO)

$$MINIMIZAR = \sum_{k=1}^2 c^k * \left[ \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} \right] + c^R * \left[ \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^2 X_{ij}^{Rt} * Q_{ij}^{Rt} \right] \quad (9)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} = 1 \quad \forall i, j, t \quad (10)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * PB^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * PB^k) \geq PB_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * EL^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * EL^k) \geq EL_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (12)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Cal^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Cal^k) \geq Cal_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (13)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Fos^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Fos^k) \geq Fos_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (14)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Pot^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Pot^k) \geq Pot_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (15)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Pot^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Pot^k) \leq 0,03 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right] \quad \forall i, j, t \quad (16)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Sod^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Sod^k) \geq Sod_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (17)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Mag^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Mag^k) \geq Mag_{\min-ij} \quad \forall i, j, t \quad (18)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * Mag^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * Mag^k) \leq 0,004 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right] \quad \forall i, j, t \quad (19)$$

$$Q_{ij}^{Rt} * FDN^R + \sum_{k=1}^2 (X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} * FDN^k) \geq 0,15 * \left[ \sum_{k=1}^2 X_{ij}^{kt} * Q_{ij}^{kt} + Q_{ij}^{Rt} \right] \quad \forall i, j, t \quad (20)$$

$$Q_{1j}^{Rt} + \sum_{k=1}^2 (X_{1j}^{kt} * Q_{1j}^{kt}) \leq 3,75 \quad \forall j, t \quad (21)$$

$$Q_{2j}^{Rt} + \sum_{k=1}^2 (X_{2j}^{kt} * Q_{2j}^{kt}) \leq 5,00 \quad \forall j, t \quad (22)$$

$$Q_{3j}^{Rt} + \sum_{k=1}^2 (X_{3j}^{kt} * Q_{3j}^{kt}) \leq 6,25 \quad \forall j, t \quad (23)$$

$$Q_{4j}^{Rt} + \sum_{k=1}^2 (X_{4j}^{kt} * Q_{4j}^{kt}) \leq 7,50 \quad \forall j, t \quad (24)$$

$$Q_{5j}^{Rt} + \sum_{k=1}^2 (X_{5j}^{kt} * Q_{5j}^{kt}) \leq 8,75 \quad \forall j, t \quad (25)$$

A função (9) corresponde ao somatório dos custos com alimentação de bovinos de corte, composto por duas espécies de pastagem, brachiaria brizantha e capim jaraguá, e um tipo de alimento concentrado, cuja formulação segue um padrão determinado. Para cada alimento são determinadas as seguintes variáveis:

- Cinco FP de bovinos Nelore: 150 kg, 200 kg, 250 kg, 300 kg e 350 kg de peso vivo, com variação de 0,5 kg entre cada faixa;
- Quatro faixas de GPD de bovinos Nelore: manutenção do peso corporal (GPD = 0,0 kg), 0,5 kg, 1,0 kg e 1,5 kg, com variação de 0,5 kg entre cada faixa a partir do primeiro GPD não nulo;
- Dois períodos climático-temporais, verão e inverno, devido ao fato de as pastagens apresentarem variação na quantidade de nutrientes disponíveis nos dois períodos.

A equação (10) restringe a utilização de apenas uma espécie (tipo) de pastagem por dieta, representado pelos números 0 e 1. As inequações (11), (12), (13), (14), (15), (17), (18) e (20) restringem as quantidades mínimas de proteína bruta, energia líquida, cálcio, fósforo, potássio, sódio, magnésio e FDN na dieta, respectivamente, para cada FP e para cada faixa de GPD.

As inequações (16) e (19) garantem as máximas quantidades de potássio e de magnésio contidas na dieta, de 3% e 0,4%, respectivamente. Por fim, as inequações (21) a (25) restringem as máximas quantidades diárias de MS a serem consumidas por um animal de, respectivamente, 150 kg, 200 kg, 250 kg, 300 kg e 350 kg.

### 1.3.5.2 Domínio das variáveis

$$Q_{ij}^{Rt} \geq 0 \quad (26)$$

$$Q_{ij}^{kt} \geq 0 \quad (27)$$

$$X_{ij}^{Rt} \in \{0,1\} \quad (28)$$

$$X_{ij}^{kt} \in \{0,1\} \quad (29)$$

$$\forall i, j, k, t \quad (30)$$

As inequações (26) e (27) definem que a quantidade consumida dos alimentos (concentrado e volumoso) deve ser maior ou igual a 0. Os conjuntos domínios (28) e (29) definem uma variável artificial binária para os alimentos concentrado e volumoso, respectivamente, que pode ser 0 ou 1. Ainda, a sentença (30) define que os cálculos deverão ser aplicados para todas as variáveis contidas em FP, GPD, TP e PP.

## 2 RESULTADOS

Para a otimização da dieta, utilizou-se a modelagem do tipo não linear inteira mista. O modelo foi rodado com auxílio do *software* Lingo®, versão 12.0. O computador utilizado foi o Acer Aspire V3-571-9423, com processador Intel Core i7 – 3632QM de 2.2GHz com Turbo Boost de 3.2GHz. A máquina contém ainda um HD Intel Graphics 4000 de 1760 MB e memória de 6 GB.

A TAB. 6 apresenta o consumo médio diário ideal de concentrado e de pastagem, em kg de MS, nas diferentes FP, e para (GPD) de 0,0 kg, 0,500 kg, 1,000 kg e 1,500 kg. Para cada faixa de GPD, é possível verificar também os menores custos diários, por animal, obtidos com a elaboração do modelo.



De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que, para todas as FP, os custos se elevaram no mesmo sentido do GPD. Este é plausível de ocorrer, pois para que um animal ganhe mais peso em um mesmo período de tempo, ele precisa ingerir uma maior quantidade de alimento. É possível verificar também que no verão o custo com alimentação foi sempre menor do que no inverno, e que o consumo de concentrado foi o mesmo nos dois períodos. Como não foram encontradas na literatura as quantidades disponíveis de magnésio e potássio para nenhuma das espécies de pastagem, o modelo precisou atender as restrições mínimas destes minerais com a quantidade disponível no alimento concentrado. Isso, aliado ao fato de o custo do concentrado ser maior do que o custo da pastagem, e de haver no modelo uma exigência mínima de consumo diário para estes dois tipos de minerais, fez com que as quantidades de concentrado consumidas no verão e no inverno fossem iguais.

TABELA 6 - Custo médio diário, em reais por cabeça, despendido com a alimentação dos animais, nas diferentes faixas de peso, e a média de consumo dos alimentos concentrado e volumoso, em kg de matéria seca por dia, no verão e no inverno

FP <sup>(1)</sup>	Verão				Inverno			
	CT <sup>(2)</sup> (Kg)	BB <sup>(3)</sup> (Kg)	CJ <sup>(4)</sup> (Kg)	Custo (R\$/cab/dia)	CT	BB	CJ	Custo (R\$/cab/dia)
150	1,05	0	2,19	1,08	1,05	0	3,09	1,39
200	1,28	0	1,84	1,28	1,28	0	3,44	1,65
250	1,51	0	2,05	1,5	1,51	0	3,32	1,85
300	1,74	0	2,32	1,72	1,74	0	3,13	2,04
350	1,96	0	2,61	1,95	1,96	0	3,12	2,25
Média	1,51	0	2,2	1,51	1,51	0	3,22	1,84

Nota: (1) Faixa de peso, (2) Alimento Concentrado, (3) Brachiaria brizantha e (4) Capim jaraguá

FONTE: Os autores (2014)

Outro fator que contribuiu para este resultado foi o fato de o consumo de matéria seca não ter sido restringido no modelo. Ainda em se tratando de resultados comuns a todas as faixas de peso, verificou-se que, de acordo com o modelo, a pastagem de brachiaria brizantha não foi consumida em nenhum momento, significando que, nas condições propostas, o capim jaraguá foi a melhor opção para todos os cenários.

O custo médio diário da dieta foi de R\$ 1,68 por cabeça, e as maiores variações nos custos, entre o verão e o inverno, foram registradas para ganhos de peso diário de 1,5 kg, em média, de 27%. Destas, a maior amplitude, de 36%, foi obtida para a faixa de peso de 150 kg. Por outro lado, observou-se a menor diferença entre os custos médios com alimentação na faixa de peso de 350 kg, de apenas 13%, para GPD de 0,5 kg.

Em média, para que um animal alcançasse ganhos de peso diário de 0,5 kg, 1,0 kg e 1,5 kg, entre os 150 kg e 350 kg de peso vivo, o custo diário com alimentação foi

de, respectivamente, R\$ 1,37, R\$ 1,63 e R\$ 1,91, no verão, e de R\$ 1,61, R\$ 1,99 e R\$ 2,39, no inverno. Isso significa que, em média, gastou-se R\$ 1,49 para se chegar a um ganho de peso diário de 0,5 kg, R\$ 1,81 para um GPD de 1,0 kg, e R\$ 2,15 para que um animal Nelore atingisse um ganho de peso de 1,5 kg por dia. Para a manutenção de um animal, considerando-se a média de todas as FP, o custo diário com alimentação foi de R\$ 1,23.

## CONCLUSÃO

Durante a elaboração do estudo, constaram-se algumas limitações, tais como a dificuldade de mensuração de todos os aspectos que englobam a produção de gado de corte, que envolve variáveis mercadológicas, biológicas e meteorológicas, a ausência de todas as informações reais da propriedade necessárias à elaboração do modelo, levando a problemas na coleta dos registros administrativos, que em alguns casos foram incompletos ou até inexistentes, além da dificuldade para encontrar dados atuais na literatura, principalmente no que diz respeito à área de nutrição de animais ruminantes, assim como dados atuais da composição nutricional de espécies forrageiras.

Conclui-se que o modelo elaborado pode ser utilizado para a propriedade em questão, além de servir como base para o desenvolvimento de outros estudos na área de Pesquisa Operacional aplicada à bovinocultura de corte, mais especificamente para a produção de animais em pastejo. Entretanto, são necessárias adequações que condigam com as particularidades de cada sistema produtivo e de cada propriedade rural.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO FILHO, A. J. B. V.; NEVES, E. M. Pesquisa operacional na agricultura brasileira. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE MATEMÁTICA APLICADA À COMPUTAÇÃO, 11., 1988, Botucatu. **Anais...** Botucatu: 1988.
- CAIXETA-FILHO, J. V. **Pesquisa operacional**: técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. 2. ed. 5. reimpr. São Paulo: Atlas, 2011.
- COUTINHO, J. D. V.; SILVA, M. I. M. T. **Aplicação de programação linear para o cálculo da compra de insumos para rações de vacas leiteiras**. 2013. 86 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- DAMASCENO, T. K.; LOPES, M. A.; COSTA, F. P. Análise da rentabilidade da produção de bovinos de corte em sistema de pastejo: um estudo de caso. **Acta Tecnológica**, São Luíz, v. 7, n. 2, p. 18-24, 2012.
- DOSSA, D. Programação linear na gestão da propriedade rural: um enfoque alternativo. **Revista Teoria e Evidência Econômica**, Passo Fundo, v. 2, n. 4, p. 31-57, nov. 1994.
- EUCLIDES FILHO, K.; EUCLIDES, V. P. B. Desenvolvimento recente da pecuária de corte brasileira e suas perspectivas. In: PIRES, A. V. **Bovinocultura de corte**. Piracicaba: FEALQ, 2010. p. 11-40.
- GARRET, W. N. Factors influencing energetic efficiency of beef production. **Journal Animal Science**, Champaign, Ill., v. 51, n. 6, p. 1434-1440, 1980.
- GIONBELLI, M. P. et al. **Exigências nutricionais de minerais para bovinos de corte**. 2010. Disponível em: <<http://www.brccorte.com.br/bundles/junglebrccorte2/book/br/c7.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2014.
- LAGE, H. F. **Partição da energia e exigência de energia líquida para manutenção de novilhas Gir e F1 Holandês X Gir**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Nutrients requirements of beef cattle**. 7<sup>th</sup>. Washington D.C.: National Academic, 1996.
- SANTOS, A. F.; RODRIGUES, M. T.; LISBOA FILHO, J. Modelo computacional para formulação de rações de mínimo custo para pequenos ruminantes utilizando programação linear. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., 2006, Bauru. **Anais...** São Paulo: Unesp, 2006.
- SILVA, F. F. et al. Exigências líquidas e dietéticas de energia, proteína e macroelementos minerais de bovinos de corte no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 2, p.776-792, mar./abr. 2002.
- SIMÕES, A. R. P.; MOURA, A. D.; ROCHA, D. T. Avaliação econômica comparativa de sistemas de produção de gado de corte sob condições de risco no Mato Grosso do Sul. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 51-72, 2006.
- VALADARES FILHO, S. C.; ROCHA JUNIOR, V. R.; CAPELLE, E. R. **Tabelas brasileiras de composição de alimentos para bovinos (CQBAL 2.0)**. Viçosa: UFV, Universidade Federal de Viçosa, 2002.

VALADARES FILHO, S. C.; PAULINO, P. V. R.; MAGALHÃES, K. A. **Exigências nutricionais de bovinos de corte no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 20., 2005, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Zootec, 2005.

VELLOSO, L.; STRAZZACAPPA, W.; PROCKNOR, M. Valor nutritivo e disponibilidade forrageira de um pasto de capim jaraguá - fase de inverno. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, SP, v. 39, n. 2, p. 207-214, 1982.