

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE  
DARCY RIBEIRO**

**JÚLIA GAZZONI JARDIM**

**AVALIAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA  
METABOLIZABILIDADE DA DIETA EM FUNÇÃO DO PLANO NUTRICIONAL**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
Março – 2012**

**JÚLIA GAZZONI JARDIM**

**AVALIAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA  
METABOLIZABILIDADE DA DIETA EM FUNÇÃO DO PLANO NUTRICIONAL**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.

**ORIENTADOR: ALBERTO MAGNO FERNANDES**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**2012**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 00/2012

Jardim, Júlia Gazzoni

Avaliação empírica de modelos de predição da metabolizabilidade da dieta em função do plano nutricional / Júlia Gazzoni Jardim. – 2012.

72 f. : il.

Orientador: Alberto Magno Fernandes

Dissertação (Mestrado - Ciência Animal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2012.

Bibliografia: f. 23 – 30.

1. Otimização não linear 2. Ruminante 3. Sistemas de alimentação 4. Consumo e digestibilidade I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

CDD - 636.2085

**AVALIAÇÃO EMPÍRICA DE MODELOS DE PREDIÇÃO DA  
METABOLIZABILIDADE DA DIETA EM FUNÇÃO DO PLANO  
NUTRICIONAL**

**JÚLIA GAZZONI JARDIM**

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.

Aprovada em 14 de março de 2012.

**Comissão Examinadora:**

---

Douglas Sampaio Henrique (D. Sc., Zootecnia) - UTFPR

---

Mirton José Frota Morenz (D. Sc., Ciência Animal) – EMBRAPA Gado de Leite

---

Prof. Ricardo Augusto Mendonça Vieira (D. Sc., Zootecnia) – UENF  
Co-Orientador

---

Prof.Dr. Alberto Magno Fernandes (D.Sc., Zootecnia) – UENF  
Orientador

*A Deus, meu refúgio e fortaleza.  
Ao meu pai, Jorge de Abreu Jardim  
A minha mãe, Ruth Regina Gazzoni Jardim.  
Ao meu irmão, Bruno Gazzoni Jardim.  
Ao meu noivo, Bruno Borges Deminicis.*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA) e ao Laboratório de Zootecnia e Nutrição Animal (LZNA), pelo oferecimento deste curso.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

Ao meu orientador e professor Alberto Magno Fernandes pela confiança depositada em meu trabalho durante o Mestrado.

Ao professor Ricardo Augusto Mendonça Vieira pelos conhecimentos compartilhados, sem o qual este trabalho nunca teria sido realizado.

Aos meus colegas Nardele Rohem Júnior, Cícero Pina, Raoni Nazário Dias, Norberto Rocha, Raphael Pavesi, Matheus de Abreu Lima e Tatiana Oliveira da Silva por estarem sempre prontos a ajudar e contribuir com esse trabalho.

Aos Funcionários Sr. Antônio, Sr Paulo, Alcir, Fabio, aos seguranças do Núcleo experimental de Zootecnia pelo auxílio nos trabalhos na fase de campo.

Ao professor Carlos Augusto Alencar Fontes, por conceder o alojamento do setor de bovino de corte durante a fase de campo.

Aos meus colegas da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Keithon Monteiro, Bernardo Murta e Patrícia Rodrigues pela colaboração em meu experimento.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES)- *Campus Alegre*, em especial Tércio e Pedro, por conceder e confiar o Laboratório de Bromatologia em minhas mãos e a Géssica e Willys por me ajudar nas análises de proteína.

Ao meu noivo Bruno Borges Deminicis, por estar ao meu lado em todos os momentos deste trabalho, pela incansável ajuda, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis, e principalmente pelo amor, carinho e paciência.

A minha amiga, irmã, Daniela Batista Oss, pelo empréstimo dos seus eficientes neurônios que sempre colaboraram com o meu aprendizado, por sempre estar com seu ombro e ouvidos disponíveis e por seu imenso companheirismo.

A Renata Soares Tavares, por sua amizade, carinho, pelas conversas até altas horas da noite, pela acolhida em sua casa e por seus deliciosos quitutes.

A Fernanda Queirós Costa e Danielly Detoni por me acolherem em sua república e transformar esses dias de convivência mais alegres, leves e divertidos.

A Priscilla Cortizo e Patrícia Rodrigues, pela amizade e momentos de descontração sempre marcantes.

Aos meus pais, meus incentivadores, direcionadores, meus maiores educadores, por sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida e por sempre me proporcionarem tudo para garantir que eu me tornasse a pessoa que sou.

A minha prima, Roberta Selbach pelas correções ortográficas.

A toda família Gazzoni e Jardim por me incentivar e orar constantemente por mim.

Àqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

**OBRIGADA!**

*“Ando devagar porque já tive pressa,  
E levo esse sorriso, porque já chorei de mais,  
Cada um de nós compõe a sua história, cada ser em si  
Carrega o dom de ser capaz, e ser feliz.*

*Conhecer as manhãs e as manhãs  
O sabor das massas e das maçãs  
É preciso amor pra poder pulsar  
É preciso paz pra poder sorrir  
É preciso chuva para florir*

*Penso que cumprir a vida seja simplesmente  
Compreender a marcha e ir tocando em frente  
Como um velho boiadeiro levando a boiada  
Eu vou tocando os dias pela longa estrada, eu vou  
Estrada eu sou*

*Todo mundo ama um dia, todo mundo chora  
Um dia a gente chega e no outro vai embora  
Cada um de nós compõe a sua história  
E cada ser em si carrega o dom de ser capaz  
E ser feliz.”*

Almir Sater / Renato Teixeira



## BIOGRAFIA

**JÚLIA GAZZONI JARDIM**, filha de Jorge de Abreu Jardim e Ruth Regina Gazzoni Jardim, nasceu em 04 de novembro de 1986, na cidade do Rio de Janeiro, Estado do Rio de Janeiro. Concluiu o 2º grau na “Sociedade Educacional Professor Altair Mongruel” - SEPAM, Ponta Grossa - PR, em dezembro de 2003. Ingressou em março de 2006 no curso de graduação em Zootecnia da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, em Marechal Cândido Rondon - PR, graduando-se em dezembro de 2009. Em março de 2010, iniciou o curso de Pós-Graduação “*Stricto sensu*” em Ciência Animal – Nutrição e Produção Animal, Mestrado, na UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO, em Campos dos Goytacazes - RJ, submetendo-se à defesa de dissertação em 14 de março de 2012.

## RESUMO

JARDIM, Júlia Gazzoni, *M.Sc.*, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; março de 2012. **Avaliação empírica de modelos de predição da Energia Digestível e da metabolizabilidade em função do plano nutricional.** Professor Orientador: Alberto Magno Fernandes.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do plano nutricional ( $L$ ) sobre o consumo e digestibilidade da matéria seca (MS), matéria orgânica (MO), proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), carboidratos não fibrosos (CNF), fibra em detergente neutro (FDN) e metabolizabilidade ( $q_m$ ) de dietas utilizando ovinos como modelo experimental. Valores absolutos (J ou  $\text{g/kg}^{3/4}/\text{d}$ ) foram expressos em itálico, por exemplo, *PB* e concentrações (g / kg), usando letras maiúsculas normais dentro de colchetes, por exemplo, [PB]. Dois quadrados latinos balanceados com quatro tratamentos foram realizados simultaneamente com quatro níveis múltiplos de manutenção  $ME = M_m$ ;  $1.5M_m$ ;  $2M_m$ ;  $2.5M_m$ , sendo ME o consumo de energia metabolizável e  $M_m$  consumo de energia metabolizável para manutenção. Oito carneiros machos e castrados foram distribuídos aleatoriamente como colunas em quatro períodos simultâneos em dois quadrados latinos. A energia metabolizável ( $EM$ ), energia metabolizável para manutenção ( $Mm$ ), proteína metabolizável ( $PM$ ) e ingestão de fibra em detergente neutro (FDN) foram submetidos a restrições não-lineares e tratados como um problema de programação não-linear geral usando o Microsoft® Excel Solver® como método de resolução Newton. O consumo de nutrientes, nutrientes digestíveis,

energia digestível (ED) e as quantidades de fezes e urina produzidas diariamente foram medidos e analisados por um modelo linear misto. A metabolizabilidade corrigida ( $q'_m$ ) e plano nutricional corrigido ( $L_c$ ) foram obtidos com base na digestibilidade, perda urinária e perda simulada de metano. Algumas variáveis tiveram suas tendências reanalisadas pelos valores observados da regressão contra  $L_c$ . Todas as variáveis analisadas foram afetadas pelo  $L$  exceto  $q'_m$ . As sobras aumentaram significativamente com o aumento do  $L$ . A concentração de [PB] das sobras não foi afetado pelo  $L$  ( $P = 0,152$ ). O mesmo aconteceu para os teores fecais de [MS], [PB], [EE] e [FDN], com valores  $P$  de 0,747 e 0,079, 0,072 e 0,379, respectivamente. Os teores fecais de [MM] e [CNF] variaram de acordo com  $L$  de forma quadrática ( $P = 0,021$  e  $P = 0,047$ , respectivamente). O teor de nitrogênio urinário e o conteúdo de energia urinária não foram afetados por  $L$  ( $P = 0,414$  e  $P = 0,304$ , respectivamente). A quantidade de matéria seca urinária excretada diária não foi afetada por  $L$  ( $P = 0,618$ ), e a média geral foi de  $5.1 \pm 1.2 \text{ g/kg}^{3/4}/\text{d}$ . Os consumos de matéria seca e matéria orgânica aumentaram de forma assintótica com o aumento de  $L_c$ . Valores observados imediatamente abaixo da manutenção foram aproximadamente constantes. Consumo de nutrientes digestíveis aumentou linearmente acima da manutenção. A média da energia metabolizável das dietas calculadas para tabular valores de energia metabolizável pode ser tendenciosa e subestimada em alguma extensão.

**Palavras-chave:** Otimização não linear, ruminantes, consumo e digestibilidade.

## ABSTRACT

JARDIM, Júlia Gazzoni, M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; March 2012. **Empirical evaluation of models for predicting dietary metabolizable according to the nutritional plan.** Adviser: Alberto Magno Fernandes.

The purpose of this study was to evaluate the effect of the plane of nutrition ( $L$ ) on intake and digestibility of dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein (CP), crude fat (CF), non fibrous carbohydrates (NFC), neutral detergent fiber (NDF) and metabolizability ( $q_m$ ) of diets using sheep as an experimental model. Absolute amounts (J or  $\text{g/kg}^{3/4}/\text{d}$ ) were expressed in italics, e.g.,  $CP$ , and concentrations (g/kg) using normal capital letters within square brackets, e.g., [CP]. Two balanced four-treatments Latin squares were conducted simultaneously with four multiples of maintenance levels:  $ME = M_m$ ;  $1.5M_m$ ;  $2M_m$ ;  $2.5M_m$ ; being ME the metabolizable energy intake and  $M_m$  the metabolizable energy intake for maintenance. Eight wethers were randomly assigned as columns in two simultaneous four periods Latin squares. The metabolizable energy ( $ME$ ), metabolizable energy for maintenance ( $M_m$ ), metabolizable protein ( $MP$ ) intake and neutral detergent fiber (NDF) were subjected to nonlinear constraints and treated as a general nonlinear programming problem by using Microsoft<sup>®</sup> Excel<sup>®</sup> Solver<sup>®</sup> with the Newton's method of resolution chosen. The intake of nutrients, digestible nutrients, digestible energy ( $DE$ ) and the amounts of feces and urine produced daily were measured and analyzed by a mixed

linear model. The corrected metabolizability ( $q'_m$ ) and plane of nutrition ( $L_c$ ) were obtained on the basis of the digestible, urinary and simulated methane losses. Some variables had their trends reanalyzed by regressing observed values against  $L_c$ . All variables analyzed were affected by  $L$  excepting  $q'_m$ . Orts increased significantly as the  $L$  increased. The [CP] content of the Orts was unaffected by  $L$  ( $P = 0.152$ ). The same happened for fecal [DM], [CP], [CF], and [NDF] contents, with P-values of 0.747, 0.079, 0.072, and 0.379, respectively. The fecal contents of [Ash] and [NFC] varied according to  $L$  in a quadratic fashion ( $P = 0.021$  and  $P = 0.047$ , respectively). The urinary nitrogen content and the urinary energy content were not affected by  $L$  ( $P = 0.414$  and  $P = 0.304$ , respectively). The amount of urinary dry matter excreted daily was unaffected by  $L$  ( $P = 0.618$ ), and the general mean was  $5.1 \pm 1.2$  g/kg<sup>3/4</sup>/d. The intakes of dry matter and organic matter increased in an asymptotic fashion as  $L_c$  increased. Immediately below maintenance observed values were approximately constant. Digestible amounts eaten increased linearly above maintenance. The mean energy metabolizability of the diets computed from tabular metabolizable energy values might be biased and underestimated to some extent.

**Keywords:** Nonlinear optimization; ruminants; intake; digestibility.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1. Sistemas para avaliação de alimentos e determinação das exigências nutricionais dos ruminantes .....	3
2.1.2. Os sistemas britânicos ARC e AFRC .....	7
2.2. Valor Nutritivo dos alimentos.....	8
2.2.1. Digestibilidade .....	9
2.2.2. Digestibilidade total.....	9
2.2.3. Digestibilidade aparente .....	10
2.2.4. Digestibilidade verdadeira .....	10
2.3. Consumo de Matéria Seca.....	10
2.4. Valor Energético dos Alimentos .....	12
2.4.1. Energia bruta (EB) .....	12
2.4.2. Nutrientes Digestíveis Totais (NDT) .....	12
2.4.2.1. Estimativa do NDT .....	12
2.4.3. Energia digestível (ED).....	14
2.4.4. Energia metabolizável (EM, M / D) .....	15
2.4.4.1. Metabolizabilidade .....	16
2.4.4.2. Eficiência de utilização da EM.....	17
2.5. Manutenção e metabolismo basal.....	17
2.5.1. Exigência de energia para manutenção.....	18
2.5.2. Nível de alimentação (L) .....	19
2.6. Energia Líquida .....	19
2.7. Dinâmica do alimento no rúmen.....	20
<b>3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>23</b>
<b>4. CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>31</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A energia é tida como o primeiro fator limitante à vida e às funções produtivas, desta forma, a sua determinação nos alimentos é de extrema importância para o perfeito atendimento das exigências nutricionais dos animais. A manutenção do corpo do animal representa grande parte da energia alimentar requerida para produção, o que torna a energia o ponto mais crítico na formulação de ração (WEISS, 1993). A energia nos alimentos pode ser expressa como energia bruta (EB), energia digestível (ED) ou nutrientes digestíveis totais (NDT) e energia líquida (EL). Embora a EL seja a forma mais correta de expressar a energia útil dos alimentos, a sua determinação é de elevado custo, laboriosa e, por ser a energia perdida nas fezes, a maior e mais variável dentre todas as perdas de um alimento, o conhecimento da ED ou do NDT é de fundamental importância (WEISS, 1993; NRC, 2001;). O teor de ED dos alimentos pode ser determinado por intermédio de ensaios de digestão ou estimado por meio de equações que empregam seus constituintes (WEISS, 1993; NCR, 2001).

A concentração Energia Metabolizável (EM) na matéria seca na ração ou dieta, foi proposto pelo ARC (1965), devido à escassez de dados sobre Energia Bruta em alimentos para ruminantes. A EM já está bem estabelecida como um método de estimação da eficiência de utilização da EM para manutenção ( $k_m$ ), ganho ( $k_f$ ) e líquida ( $k_l$ ), quando se utiliza o sistema de EM na prática. No entanto, AFRC (1990) recomendou que uma maior precisão fosse alcançada na formulação de dietas e predição de desempenho se a metabolizabilidade ( $q_m$ ) fosse mais amplamente utilizada como a base para o cálculo das eficiências de utilização EM. A

metabolizabilidade em manutenção ( $q_m$ ) da [EB] de um alimento, é definida pelo AFRC (1993) como a proporção de [EM] e [EB] em um alimento. É comum estimar a digestibilidade aparente da dieta usando a metabolizabilidade, para isso multiplica-se o fator de perdas de energia urinária e gasosa. As perdas proporcionais de energia na urina são frequentemente estimadas a partir da excreção de nitrogênio por unidade de alimento ingerido (BLAXTER, 1962).

A dificuldade de se avaliar a disponibilidade energética e a importância de se conhecer o conteúdo de energia dos alimentos tem levado ao desenvolvimento de métodos para estimar o conteúdo de energia disponível (WEISS *et al.*, 1992). Considerando que a sua determinação é cara e laboriosa a avaliação de equações para a sua estimativa tem sido constante, por meio de avaliação empírica do poder preditivo do modelo.

Com este estudo objetivou-se avaliar o efeito do plano nutricional sob a estimativa da energia digestível e da metabolizabilidade das dietas utilizando ovinos como modelo experimental.



## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Sistemas para avaliação de alimentos e determinação das exigências nutricionais dos ruminantes

O desenvolvimento dos diversos sistemas de alimentação de ruminantes sempre caminhou paralelamente ao aprimoramento das técnicas de avaliação e caracterização dos alimentos.

O sistema Weende para análise de alimentos (também chamado de método de análise por aproximação), estabelecido há mais de 150 anos, baseia-se na determinação das proporções de umidade, compostos nitrogenados, cinzas, extratos solúveis em éter e porções fibrosas insolúveis em ácido e álcali e foi a primeira base para a estimação de valores de energia dos alimentos, mais precisamente, do total de nutrientes digestíveis (NDT). Entretanto, tem sua utilização muitíssimo limitada quando se busca conhecer precisamente o valor nutritivo dos alimentos, as exigências nutricionais e, assim, a predição do desempenho animal (SALVADOR, 2007).

Sniffen *et al.* (1992) enfatizaram que para se alcançar um melhor ajuste na formulação de dietas para ruminantes, obtendo-se concomitantemente redução em custos, faz-se necessário que os alimentos utilizados pelos animais tenham suas características químicas bem definidas, com suas porções componentes fracionadas no sentido de melhor caracterizá-las sob a ótica da alimentação animal. Assim, o fracionamento de compostos nitrogenados e de carboidratos tem por base o modo diferenciado de como os microrganismos do rúmen fazem uso destes, levando-se em

consideração as diferenças quanto à utilização dos carboidratos para manutenção e crescimento, quanto à utilização e natureza dos compostos nitrogenados consumidos e à sincronização entre a disponibilidade de energia e nitrogênio para maximização do crescimento microbiano em nível ruminal (RUSSELL *et al.*, 1992; SNIFFEN *et al.*, 1992; e NRC, 1996). Na busca por atender a essa necessidade, o sistema proposto por Goering e Van Soest (1970), com base na solubilidade dos alimentos em soluções detergentes, permitiu a identificação e classificação de diferentes porções dos alimentos, fazendo inferências às suas disponibilidades biológicas. Graças a este sistema, tornou-se possível a melhor caracterização, principalmente dos carboidratos, representados até então pela fibra bruta e extrativos não-nitrogenados, e também do componente nitrogenado (proteína bruta) dos alimentos.

Paralelamente, conceitos sobre a nutrição de ruminantes têm evoluído de forma considerável nas últimas duas décadas. Até o final da década de 70, as estimativas das exigências energéticas e proteicas eram obtidas a partir de ensaios de desempenho e digestibilidade. O desenvolvimento e aprimoramento dos ensaios de metabolismo, a partir da década de 80, possibilitaram o desenvolvimento do método fatorial de exigências utilizado até o momento pelos principais sistemas disponíveis.

As exigências em proteína determinadas pela abordagem fatorial consideram separadamente as demandas de manutenção (sendo nestas incluídas as perdas endógenas de nitrogênio através das fezes e urina e por intermédio da descamação da pele) e em especial pelo montante de aminoácidos disponíveis para a absorção. As fontes de proteína que chegam ao intestino dos ruminantes são a proteína microbiana, a proteína dietética que não sofreu a ação da microbiota ruminal (durante sua permanência nas câmaras pré-gástricas) e a proteína endógena. Ao “pool” dos aminoácidos provenientes da digestão dessas fontes e absorvidos no intestino dá-se o nome de proteína metabolizável. (BURROUGHS *et al.*, 1975a; ARC, 1980). O atendimento às exigências totais por proteína pelos tecidos dos animais ruminantes é obtido pela absorção, ao nível do intestino delgado, dos produtos finais resultantes dos processos digestivos sofridos por compostos nitrogenados, em especial pelo montante de aminoácidos disponibilizados para a absorção. (SANTOS, 2006).

Estes avanços no conhecimento da caracterização e composição química dos alimentos bem como na determinação das demandas nutricionais dos animais, teve sua integração facultada e ampliada graças ao advento da tecnologia dos computadores, cujo impulso de desenvolvimento iniciou-se por volta dos anos 60.

Graças a esta tecnologia, a habilidade dos cientistas em descrever matematicamente as relações biológicas foi grandemente incrementada e assim, modelos matemáticos passaram a ser construídos objetivando descrever vários aspectos relacionados à nutrição e alimentação animal (RUSSELL, 2002).

Define-se um modelo como uma representação simplificada, abstrata e idealizada de determinada realidade. Qualquer tipo de modelo, por definição, deve basear-se em argumentações ordenadas, lógicas e justificáveis, pressupostas a partir do conhecimento científico existente sobre o assunto em questão. Um modelo matemático nada mais é do que uma equação ou um conjunto de equações que representam o comportamento de um sistema, cuja resolução implica a predição de mudanças que podem ocorrer na realidade; é a consequência ou o resultado direto de empreendimentos analíticos para a abstração e definição do mundo real, em termos matemáticos precisos (MERTENS, 1976).

Os modelos matemáticos são essencialmente classificados como 'deterministas' ou 'estocásticos', 'dinâmicos' ou 'estáticos' e 'empíricos' ou 'mecanicistas'. Modelos deterministas são baseados na pressuposição de que as soluções obtidas derivam de equações ou funções exatas, entretanto é sabido que dados biológicos frequentemente tem elevado grau intrínseco de variabilidade. Os modelos estocásticos (também ditos probabilísticos) se valem de relações estatísticas no cômputo das variações, tendo estas a amplitude da variância de cada um de seus componentes. Modelos estáticos ignoram o efeito do tempo, mas modelos dinâmicos descrevem relações tempo-dependente dos fatores que tenham esta característica (BALDWIN e DONOVAN, 2000; Russell, 2002).

Modelos empíricos são construídos a partir da descrição da observação de dados, os quais são ajustados a uma equação (ou conjunto de equações matemáticas). Já os modelos mecanicistas (também denominados 'teóricos') buscam promover a descrição de um sistema com a compreensão dos fatores causais concernentes com os mecanismos envolvidos no sistema em estudo. Estes modelos são construídos através do exame da estrutura do sistema, compartimentalizando-o e analisando o comportamento de todo o sistema em termos dos componentes individuais (compartimentos) e das interações entre eles (DIJKSTRA e FRANCE, 1995).

Os sistemas de alimentação de ruminantes atualmente em uso se valem principalmente de equações empíricas (AFRC, CSIRO, INRA, NRC, DVB/OEB-System

- DIJKSTRA *et al.*, 1998). Embora difiram entre si, quanto à terminologia e detalhamento, estes sistemas são conceitualmente similares em seus objetivos de prever o fluxo de energia disponível aos animais e microrganismos ruminais em uma quantidade de N passível de ser utilizada por aqueles seres, pela estimativa de síntese de proteína microbiana e pelo consequente N-aminoácido microbiano que seja disponível ao ruminante hospedeiro, pelos aspectos cinéticos dos nutrientes no rúmen, pelo 'rendimento' de nutrientes que alcança o intestino delgado e conseqüentemente, pelo próprio desempenho animal.

Comparativamente aos modelos empíricos, os conceitos adotados nos modelos mecanicistas são mais variáveis posto que os objetivos da modelagem mecanicista e as hipóteses subjacentes são completamente diferentes. O principal objetivo dos modelos mecanicistas do rúmen é o de prover um conhecimento integrado dos aspectos envolvidos e permitir prever o perfil de nutrientes, disponível para absorção. Outro aspecto também desconsiderado nos atuais modelos empíricos refere-se à consideração dada às variações ocorrentes quanto ao tempo, relevando assim as oscilações entre dias e dentro de cada dia, fazendo com que os modelos empíricos observem o animal segundo uma condição 'steady-state', o que absolutamente não condiz com a realidade, classificando assim estes sistemas como empíricos e estáticos (SNIFFEN e ROBINSON, 1987).

Tem-se ainda que os modelos possam conter tanto elementos empíricos como mecanicistas em sua construção, sendo assim chamados de modelos mistos, como é o caso do sistema de Cornell (CNCPS). Para exemplificar esta característica, pode-se citar que este sistema relaciona a disponibilidade de substratos à utilização da energia em processos de crescimento e não-crescimento microbiano (enfoque mecanístico), mas a degradação dos substratos é representada sem considerar a interação dos efeitos entre carboidratos e nitrogênio ou os efeitos das atividades microbianas sobre a degradação da matéria orgânica no rúmen (enfoque empírico).

Seja como for, cada abordagem assumida de modelagem possui vantagens e desvantagens, dependendo do objetivo específico. Um modelo empírico baseado diretamente em um conjunto definido de dados pode, dentro deste limite, prover respostas bastante acuradas em sua predição. Em contrapartida, modelos mecanicistas, que tiveram seus componentes e parâmetros advindos de numerosos e variados bancos de dados, podem não fornecer predições tão exatas, entretanto permitem um entendimento melhor do comportamento do sistema como um todo.

Outro aspecto importante reside no fato de que os modelos empíricos são normalmente mais simples e, portanto, mais facilmente utilizáveis, constituindo por esta razão práticas ferramentas utilizadas inclusive na elaboração de dietas.

Os alimentos produzidos sob condições tropicais apresentam composição nutricional diferente dos alimentos obtidos em condições temperadas (Van Soest, 1994). Além disso, é notória a existência de poucos dados sobre a caracterização das frações que constituem as proteínas e os carboidratos de alimentos cultivados em regiões tropicais, tornando a predição mecanicista do desempenho animal com sistemas desenvolvidos em condições temperadas ainda mais complexas. Estas circunstâncias tornam cada vez mais necessárias a avaliação das frações dos alimentos tropicais a fim habilitar os nutricionistas a fazer predições mais confiáveis sobre o desempenho dos animais (FOX *et al.*, 1992).

### **2.1.2 Os sistemas britânicos ARC e AFRC**

Os sistemas de nutrição e alimentação de ruminantes de origem britânica (ARC, 1980 e AFRC, 1993) trouxeram relevantes contribuições sobre a utilização dos nutrientes por estes animais. O conceito de energia metabolizável assumido pelo ARC (1980) tem como base a relação entre os consumos de energia metabolizável (nos alimentos ou dieta) com a retenção da energia líquida nos produtos e no metabolismo animal. A ingestão de energia metabolizável refere-se à energia bruta ingerida menos a energia bruta contida nas fezes, urina e gases de combustão (principalmente metano), expresso em MJ/d ou MJ/kg MS.

Especificamente no que diz respeito ao aproveitamento da energia, o ARC (1980) estabeleceu o conceito da metabolizabilidade ( $q$ ), definida como a energia metabolizável do alimento dividida por sua energia bruta. A metabolizabilidade da energia à manutenção é simbolizada por  $q_m$  e, em qualquer outro nível de alimentação,  $q_L$ . A eficiência de utilização da energia metabolizável (simbolizada por  $k$ ) é definida como o aumento na retenção de energia que ocorre por unidade de incremento de energia metabolizável oferecida, tendo por isso estreita relação com a metabolizabilidade da energia em cada alimento. A eficiência de utilização da energia metabolizável foi então apresentada como função linear da metabolizabilidade da energia, sendo específica quanto à função fisiológica de interesse (manutenção, ganho de peso corporal, lactação, etc.).

Por convenção, os sistemas de alimentação consideram que quando a retenção de energia corporal é zero, diz-se que o animal está em manutenção, ou seja, consome e dissipa energia para a manutenção dos processos vitais e metabólicos básicos. Já a retenção de energia refere-se à taxa de deposição energética corporal, que pode ser obviamente negativa quando o nível de ingestão energética está abaixo da manutenção. Considerando que a energia metabolizável de cada alimento possui uma metabolizabilidade que lhe é peculiar e a eficiência com que é utilizada é variável em função do objetivo de seu uso, faz-se imperativo que, para se estimar as exigências de energia metabolizável de manutenção e ganho de peso seja necessário, primeiramente, estimar a exigência líquida de energia para manutenção e para ganho, respectivamente.

O ARC (1980) relacionou ainda a quantidade de energia provinda do alimento consumido e a exigência energética dos animais, auferindo quantas vezes à energia exigida para manutenção é ingerida, e a este valor foi dado o nome de nível de produção, representado por L. O sistema AFRC (1993) também assume este postulado. Este valor calculado, enquanto não considerado para o computo das demandas energéticas, é levado em conta para o cálculo do potencial de crescimento microbiano ruminal.

A inclusão de proteína dietética se desenvolve em uma segunda etapa do balanceamento conforme apresentada para o ARC (1980) e AFRC (1993). A partir da definição da concentração energética da dieta, que é função do consumo, peso vivo, composição e intensidade de ganho de peso, busca-se incluir proteína degradável na dieta a fim de atender prioritariamente à demanda de proteína para crescimento microbiano ruminal. Desta forma, a inclusão de uma dada fonte de proteína verdadeira ou de NNP dependerá da escala de crescimento microbiano que o balanço energético da dieta permite.

## **2.2. Valor Nutritivo dos alimentos**

O valor nutritivo dos alimentos é classificado pelos nutricionistas em três componentes: digestibilidade, consumo alimentar e eficiência energética. A aplicação prática da avaliação dos alimentos assume que eles são variáveis e as respostas animais são comparativamente reproduzíveis. A digestibilidade é muito mais avaliada que a eficiência ou o consumo, sendo que o consumo e a eficiência são mais

responsáveis pela resposta animal total. Acontece que a eficiência e o consumo oferecem muitas variações entre os animais e assim, o estabelecimento dos valores alimentares relativos para estes componentes é mais difícil que para a digestibilidade. Considera-se que a eficiência e o consumo relacionam-se com a digestibilidade. Porém, isto nem sempre é verdade. A resposta do animal em diferentes digestibilidades pode ocorrer pela compensação em ingerir mais alimento de qualidade inferior. O volume e as lentas taxas de digestão limitam a quantidade ingerida deste tipo de volumoso (VAN SOEST, 1994).

### **2.2.1. Digestibilidade**

O balanço de matéria perdida na passagem através do trato digestivo é o que melhor mensura o aproveitamento de um alimento. Acontece que as fezes não contêm apenas o alimento não digerido, mas também produtos metabólicos como bactérias e perdas endógenas do metabolismo animal. (VAN SOEST, 1994)

A medida mais importante do valor de energia de um alimento para animais é a sua digestibilidade determinada *in vivo*; *in vitro* por incubação com líquido ruminal (TILLEY e TERRY, 1963) ou com pepsina e celulase (McLEOD e MINSON, 1978); ou pelo NIRS (Near-infrared spectroscopy) (COOLEMAN e HENRY, 2002). Todas as determinações por métodos indiretos devem incluir amostras de digestibilidade *in vivo* conhecidas como referências e como há uma diminuição da digestibilidade com o aumento da ingestão de alimentos, os valores de referência devem ser obtidos em nível de manutenção.

A digestibilidade verdadeira é o balanço entre a dieta e os respectivos resíduos alimentares que escaparam da digestão e chegaram às fezes, excluindo os produtos metabólicos. O coeficiente de digestibilidade verdadeira é sempre mais alto que o da digestibilidade aparente (VAN SOEST, 1994).

### **2.2.2. Digestibilidade total**

Para determinar a digestibilidade total é necessário medir a quantidade que um nutriente é consumido por dia e quanto desta substância correspondente é excretado nas fezes por dia. Se I representa a quantidade de um nutriente alimentar consumido por dia e F a quantidade de um nutriente correspondente excretado nas fezes por dia,

em seguida, por definição,  $I - F$  é a quantidade do nutriente digerido por dia (KLEIBER, 1975).

### 2.2.3. Digestibilidade aparente

A digestibilidade aparente é definida como o balanço dos alimentos menos as fezes  $(I - F) / I$  ou  $1 - F / I$ , normalmente expressa em percentagem. Isto é,  $(1 - F / I) 100$  indica a percentagem do componente de alimento ingerido que não é excretado como fezes

### 2.2.4. Digestibilidade verdadeira

O cálculo da digestibilidade verdadeira depende de análise fecal adequada e da aplicação da equação de digestibilidade parcial em um sentido especial. No momento de excreção, a maior parte do material não dietético nas fezes são resíduos microbianos. É difícil distinguir o material endógeno a partir do material proveniente do processo de digestão e fermentação já que a matéria endógena deve ter sido fermentada, como por exemplo, as mucinas e ureia que fluem para o rúmen. Consequentemente, a composição fecal pode ser dividida em duas frações que constituem o conjunto:

$$P_{fr} + P_{mr} = P_r \text{ ou } C_{fr} + C_{mr} = 1$$

Em que  $C_{fr}$  é a fração de resíduo alimentar não digerido,  $C_{mr}$  a concentração metabólica microbiana e material endógeno nas fezes e  $P_r$  a produção fecal. Esta divisão distingue-se do resíduo indigestível verdadeiro ( $P_{fr}$ ) a partir da porção das fezes de origem não dietética ( $P_{mr}$ ). O material indigestível aparente aparece intacto nas fezes (VAN SOEST, 1994).

## 2.3. Consumo de Matéria Seca

O controle da ingestão está em função dos mecanismos de respostas imediatas e em longo prazo (MERTENS, 1987). O mecanismo de resposta em longo prazo pode causar aumento ou diminuição na ingestão de alimento. Neste aspecto, está



relacionado o nível de produção, a demanda total de energia pelo animal, o estado fisiológico (lactação, gestação), o efeito ambiental (temperatura e umidade), a estação do ano e o fotoperíodo (GROVUM, 1988). O mecanismo de resposta imediata refere-se aos fatores que influenciam o início e término da ingestão em um mesmo dia, estes operam pela alteração nos centros da fome e saciedade localizados no cérebro, por intermédio de receptores nervosos e neurônios aferentes, que transmitem impulsos oriundos do estômago e de outros órgãos. O mecanismo de resposta imediata está diretamente relacionado à distensão do retículo-rumen, osmolaridade da dieta e presença de ácidos graxos voláteis e hormônios.

Em geral, a ingestão de matéria seca eleva-se com o aumento do peso vivo do animal. Kleiber (1975) postulou que os animais consomem energia por unidade de tamanho metabólico (UTM) a qual equivale ao  $PV^{3/4}$ . Contrariamente, Van Soest (1982), a partir de observações em espécies herbívoras, propôs que a ingestão é proporcional ao PV. Waldo (1970) enfatizou que o uso da UTM é mais eficaz para expressar a ingestão, pois é uma forma de expressar o metabolismo de energia como uma base de expressão da exigência de manutenção. Assim, a expressão da ingestão em uma mesma base (UTM), provê uma simples medida de ingestão como um múltiplo da manutenção.

Conrad *et al.* (1964) indicaram que a ingestão alimentar depende das características do animal e da dieta; se for limitada pela capacidade física do animal, quando a dieta contém altas proporções de FDN, a ingestão torna-se uma função das características da dieta (MONTGOMERY e BAUMGARDT, 1965). Dessa forma, o animal consome alimento até atingir a capacidade máxima de ingestão de FDN, que passa a inibi-la, havendo, assim, um limite de distensão ruminal que determina a interrupção da ingestão voluntária. Por outro lado, em dietas com baixa proporção de FDN e ricas em energia, a exigência fisiológica do animal é o fator que limita a ingestão (MERTENS, 1983). A primeira característica a afetar esta relação é a digestibilidade. Neste caso, o animal consome alimento para manter ingestão constante de energia, enquanto a ingestão de MS diminui com aumento da digestibilidade. O fator que determina a saciedade, controlando a ingestão neste caso, é a concentração energética da ração (VAN SOEST, 1994).

## **2.4. Valor Energético dos Alimentos**

### **2.4.1. Energia bruta (EB)**

É a quantidade total de energia nos alimentos, medida em uma bomba calorimétrica que tem a função de mostrar a quantidade de calorias liberada para elevar uma quantidade de água a uma temperatura específica.

### **2.4.2. Nutrientes Digestíveis Totais (NDT)**

O NDT é um dos modos mais empregados de expressão de energia para avaliação de alimentos. Muitos componentes químicos são relacionados à concentração de energia disponível, sendo que os constituintes comumente avaliados são matéria orgânica (MO), extrato etéreo (EE), proteína bruta (PB), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), lignina, amido e frações nitrogenadas (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2003b).

Alguns destes componentes, como gordura e proteína, têm sido especialmente correlacionados positivamente com NDT, enquanto que frações fibrosas têm apresentado correlações negativas com a disponibilidade energética dos alimentos (ROCHA JUNIOR *et al.*, 2003b). A lignina, embora constitua somente pequena proporção dos alimentos (1 a 12%), possui alta correlação negativa com a digestibilidade (WEISS, 1998).

#### **2.4.2.1. Estimativa do NDT**

O teor de NDT dos alimentos está relacionado ao conteúdo energético dos mesmos. De acordo com o NRC (1989), o sistema de energia líquida fornece valores de disponibilidade de energia muito mais precisos que o NDT, mas este sistema ainda permanece porque os valores de EL são difíceis de serem obtidos. Tradicionalmente, o teor de NDT dos alimentos era calculado como:

$NDT = PBd + 2,25 \times EEd + FBd + ENNd$ , em que PBd: proteína bruta digestível; EEd: extrato etéreo digestivo; FBd: fibra bruta digestível; ENNd: extrato não nitrogenado digestível

Weiss *et al.* (1992) propuseram uma equação de NDT com consumo de matéria seca em nível de manutenção ( $NDT_{\text{manutenção}}$ ). O NDT do alimento é calculado usando a energia produzida pelas frações químicas do alimento (carboidratos fibrosos, carboidratos não-fibrosos, lipídeos e proteína bruta), medidas ou calculadas por meio de análise de laboratório, e da digestibilidade verdadeira (obtida através do ensaio de digestibilidade). Para estimar os nutrientes digestíveis totais em nível de manutenção ( $NDT_{\text{manutenção}}$ ), de acordo com o NRC (2001), a equação utilizada é:

$$NDT_{\text{manutenção}} = PB_d + 2,25 \cdot AG_d + FDN_{cp_d} + CNF_d - 7 \quad \text{Eq.(1)}$$

em que :

*Proteína Bruta digestível para alimentos volumosos*

$$PB_d = PB \cdot \exp(-1,2 \cdot (PIDA/PB)); \quad \text{Eq.(2)}$$

em que: PIDA = proteína insolúvel em detergente ácido;

*Proteína Bruta digestível para alimentos concentrados*

$$PB_d = PB \cdot [1 - (0,4 \cdot PIDA/PB)]; \quad \text{Eq.(3)}$$

*Ácido Graxo digestível*

$$AG_d = (EE - 1) \times 100; \quad \text{Eq.(4)}$$

*Carboidrato não fibroso digestível*

$$CNF_d = 0,98 (100 - ([FDN_{cp} + PB + EE + cinzas]) \cdot FAP); \quad \text{Eq.(5)}$$

em que: FAP = fator de ajuste para processamento físico;

*Fibra em detergente neutro (corrigida para cinzas e proteína) digestível*

$$FDN_{cp_d} = 0,75 (FDN_{cp} - L) \times [1 - (L/FDN_{cp})^{0,667}]; \quad \text{Eq.(6)}$$

em que L = Lignina.

O valor 7 se refere ao NDT fecal metabólico.

O extrato etéreo não representa uma fração uniforme nos alimentos, portanto não apresenta uma digestibilidade constante entre os alimentos. Entretanto, ácidos graxos representam uma fração constante com uma digestibilidade verdadeira variando de 95 a 100%, quando as dietas possuem 3% ou menos de EE

(PALMQUIST, 1991, citado pelo NRC 2001). O conteúdo de AG pode ser calculado como  $AG = EE - 1$  (Allen, 2000, citado pelo NRC, 2001).

As equações acima são baseadas em digestibilidade verdadeira, mas o NDT é baseado em digestibilidade aparente, portanto o NDT fecal metabólico deve ser subtraído. Weiss *et al.* (1992), citado pelo NRC (2001), determinou que em média o NDT fecal metabólico equivale a 7.

Além do uso do animal para a determinação dos valores de NDT dos alimentos, pode-se estimar o NDT através de equações de regressão. As equações de regressão possuem diversas limitações, sendo que umas delas é o alto erro de predição, pois dependendo da equação ela pode ser específica para uma dada população (WEISS *et al.*, 1992).

### **2.4.3. Energia digestível (ED)**

A Energia digestível é definida pelo AFRC (1993) como a diferença entre a EB e energia das fezes (FE), normalmente há uma boa correlação entre os valores de [ED] e [EM] dos alimentos ou dietas, com  $[EM] / [ED]$  variando de 0,81 a 0,86 respectivamente.

Segundo o NRC (1996), o uso de NDT não tem nenhuma vantagem ou desvantagem sobre a energia digestível (ED) para descrever o valor energético dos alimentos ou expressar as exigências dos animais. Considera-se que 1 kg de NDT equivale a 4,409 Mcal de ED, porque os nutrientes apresentam diferentes calores de combustão, por exemplo: os carboidratos fornecem 4,2Mcal/kg MS, a proteína 5,6 Mcal / kg MS, os ácidos graxos de cadeia longa 9,4 Mcal / kg MS e o glicerol 4,3 Mcal /kg MS (MAYNARD *et al.*, 1979).

O valor da energia bruta de NDT não é constante entre os alimentos. A energia bruta de um alimento com elevada proporção de NDT fornecido pela proteína será maior do que 4,409. Inversamente, a energia bruta de um alimento com elevada proporção de NDT fornecido por carboidrato ou gordura será menor do que 4,409. Na edição anterior (NRC, 1989) essa equação foi abandonada.

A Energia digestível pode ser calculada multiplicando-se as concentrações de nutrientes digestíveis estimados (Equação 5 e 6) por seus calores de combustão, (Equação 7). Desde que a ED baseie-se sobre a digestibilidade aparente e (Equações 2 a 6) são baseados em digestibilidade verdadeira, uma correção para energia fecal

metabólica é necessária. O calor de combustão do NDT fecal metabólico foi assumido como sendo 4,4 Mcal / kg;

ED fecal metabólica =  $7 * 0,044 = 0,3$  kg / Mcal.

ED(Mcal/kg) =  $(CNFd/100)*4,2 + (FDNd/100)*4,2 + (PBd/100)*5,6 + (AG/100)*9,4 - 0,3$   
Eq.(7)

#### 2.4.4. Energia metabolizável (EM, M / D)

A energia metabolizável é definida como o calor de combustão de um alimento menos calor de combustão das fezes, urina e gases que são produzidos quando ingerido. As perdas de energia nas fezes e na urina podem ser determinadas facilmente em ovinos e bovinos mantidos em gaiolas de metabolismo, mas para determinar a energia perdida como gás (metano), envolve medidas quantitativas da troca gasosa e a utilização de um equipamento muito complexo e caro (BLAXTER, 1962).

A perda de energia através dos gases ( $CH_4$  e  $CO_2$ ) é importante para ruminantes, em decorrência da degradação ruminal, e a perda de energia na dieta ocorre através da urina, devido principalmente ao meio de excreção de nitrogênio em excesso (LAWRENCE e FOWLER, 1997).

Quando essas perdas de energia são subtraídas da energia digestível aparente ( $ED_a$ ), o saldo é chamado de energia metabolizável (EM) ou energia disponível às células dos tecidos corporais do animal, de modo que:

$EM = ED_a - \text{energia urinária} - \text{energia dos gases}$

A principal fonte de energia gasosa (gás metano) é obtida através da fermentação microbiana, o que resulta na produção de calor. Este calor é importante para manter a temperatura corporal dos animais, mas consiste em perda de energia não calculada pela EM (NRC, 2000). A EM está fortemente correlacionada a ED, porém é de difícil mensuração. Para a maioria das forrageiras e misturas de forrageiras e cereais em grãos, a proporção da EM para ED é cerca de 0,8, mas pode variar consideravelmente em função da ingestão, idade do animal e fonte dos alimentos (ARC, 1980).

De acordo com NRC (2000) a proporção da EM para ED é cerca de 0,82; como visto na equação:  $EM \text{ (Mcal/kg)} = 0,82 \times ED \text{ (Mcal/kg)}$ .

Essa equação é equivalente a alimentos com valores de 2 a 4 Mcal/kg de ED (aproximadamente 49-97% NDT), mas tende a subestimar a EM em alimentos com altos valores de ED. É interessante observar que esta equação indica que perdas de urina e gases em ruminantes ficariam em torno de 18% da ED. Há um considerável desvio a partir do valor médio de 0,81 entre alimentos e o AFRC (1993) cita um intervalo de 0,81 a 0,86. MAFF *et al.*(1990) relataram valores de 540 amostras de gramíneas, feno e silagem com uma média de  $0,81 \pm 0,03$ . Grãos de cereais têm valores mais elevados: cevada e aveia  $0,85 \pm 0,02$  e trigo  $0,86 \pm 0,02$ . A quantidade limitada de informação sobre forragens tropicais indica que o fator de 0,81 pode ser usado para esses alimentos.

O consumo de energia metabolizável (CEM), obtido a partir do consumo de energia digestível é utilizado tanto para produção de calor, representando a energia utilizada para manutenção, quanto para energia retida, na forma de crescimento, produção de carne, leite e outros. Com isso, a fórmula é a base para determinação da energia metabolizável de manutenção:

$$\text{CEM} = \text{ER} + \text{PC} \quad \text{Eq(8)}$$

em que, ER: energia retida ; PC: produção de calor;

Porém, quando a ER = 0, representa que todo o consumo de EM está sendo utilizado para manutenção, logo CEM = PC, e conseqüentemente a PC representará a energia metabolizável de manutenção (EMm).

#### 2.4.4.1. Metabolizabilidade

A metabolizabilidade em manutenção ( $q_m$ ) da [EB] é definida pelo AFRC (1993) como a proporção de [EM] e [EB] em um alimento, expressa da seguinte forma:

$$q_m = [\text{EM}] / [\text{EB}] \quad \text{Eq.(9)}$$

É comum estimar a digestibilidade aparente da dieta usando a metabolizabilidade, para isso multiplica-se o fator de perdas de energia urinária e gasosa. Porém, a determinação do calor da combustão de urina é tecnicamente difícil, logo, as perdas proporcionais de energia na urina são frequentemente estimadas a partir da excreção de nitrogênio por unidade de alimento ingerido. A perda proporcional de metano é maior em ruminantes porque a fermentação é realizada nas partes anteriores do trato digestivo, mas também é considerável em espécies em que a fermentação microbiana é realizada no intestino posterior (BLAXTER, 1962).

Um termo alternativo, a concentração [EM] na matéria seca na ração ou dieta (M/D), foi proposto pelo ARC (1965), por causa da escassez de dados sobre [EB] em alimentos para ruminantes. A M/D está agora bem estabelecida como um método de valores de cálculo relevantes para a eficiência de utilização da EM para manutenção ( $k_m$ ), ganho ( $k_f$ ) e líquida ( $k_l$ ), quando se utiliza o sistema de EM na prática. No entanto, AFRC (1990) recomendou que uma maior precisão fosse alcançada na formulação de dietas e predição de desempenho se a  $q_m$  fosse mais amplamente utilizada como a base para o cálculo das eficiências de utilização EM.

Para que a  $q_m$  da dieta possa ser convertida em valores de M/D, o ARC (1965) e MAFF (1976) assumiram um valor médio para o [EB] de 18,4 MJ / kg MS e 4,4 Mcal / kg MS, na conversão de valores  $q_m$  para valores M/D de dietas para ruminantes. Um valor médio utilizado frequentemente para a [EB] de dietas para ruminantes é de 18,8 MJ / kg MS.

#### **2.4.4.2. Eficiência de utilização da EM**

A Eficiência de utilização da EM( $k$ ),  $k_m$ ,  $k_f$ ,  $k_l$ , definida no ARC (1980), é preferencialmente estimada por equações lineares envolvendo  $q_m$ , a relação de [EM] e [EB] de um alimento ou dieta: A eficiência de utilização da EM, para manutenção ( $k_m$ ) é definida pelo AFRC (1993), por equação linear, envolvendo a metabolizabilidade:

$$k_m = 0.35q_m + 0.503$$

A eficiência de utilização da energia ingerida tende a ser maior para alimentos concentrados, quando comparadas aos volumosos, devido à variação no Incremento calórico (IC) de manutenção e IC de produção (ARC, 1980). A adição de concentrado a dietas ricas em volumosos aumenta parcialmente os valores de  $k$  para manutenção e ganho (NRC, 1984), em virtude da redução da produção de metano, da ruminação e do incremento calórico. Também, alimentos volumosos de melhor qualidade são mais eficientes que os de pior qualidade (VAN SOEST, 1994).

## **2.5. Manutenção e metabolismo basal**

O conceito nutricional de manutenção, embora relacionada ao metabolismo basal, não é o mesmo, pois o animal não está em jejum. A energia metabolizável para manutenção ( $EM_m$ ) é definida como a taxa de produção de calor de um animal mantido em um ambiente termo-neutro quando a taxa de consumo de energia metabolizável é exatamente o saldo da taxa de perda de calor (Lawrence & Fowler, 1997), logo a produção de calor correspondente a  $EM_m$  engloba a PC do animal alimentado, ou seja, considera o incremento calórico como uma forma de produção de calor, já a energia líquida de manutenção ( $EL_m$ ) é obtida do animal em jejum, ou seja, sem a produção de calor vinda do incremento calórico. A  $EM_m$  é sempre superior a  $EL_m$ , pois o processo de comer, digerir e metabolizar o alimento requer energia e esta acaba sendo liberada do animal como calor.

Os principais contribuintes para produção de calor em um animal recebendo  $EM_m$  podem estar relacionados ao processamento da dieta pelo animal como o trabalho realizado para mastigação do alimento, movimento do aparelho digestivo, calor de fermentação e o incremento calórico associado a transformação dos nutrientes, contribuindo para manter a temperatura corporal, e outras atividades como o processo de circulação, respiração, locomoção e o custo energético para a renovação de tecidos (LAWRENCE e FOWLER, 1997).

### **2.5.1. Exigência de energia para manutenção**

A exigência de energia para manutenção é tida como o consumo de oxigênio do corpo, sendo a metade dessas necessidades utilizada pelas paredes do trato gastrointestinal e fígado para absorção e metabolismos de nutrientes digeridos, um terço pela pele, rins e tecido nervoso e o restante para as atividades musculares básicas (SEAL e REYNOLDS, 1993). Variações no nível de atividades desses tecidos em função do genótipo, idade, estado fisiológico, nível de alimentação, secreção de uréia e condições ambientais modificam as exigências de energia para manutenção.

Segundo o AFRC (1998) as exigências de manutenção para caprinos, com base no peso metabólico, são maiores que para ovinos e similares a bovinos, concluindo que isto é devido ao maior metabolismo basal dos caprinos e bovinos, comparados aos ovinos. Com respeito a raças, parte das diferenças nas exigências de manutenção é explicada pela diferença no tamanho dos órgãos. A energia gasta pelas vísceras e a energia gasta pelo tecido muscular representam respectivamente 50 e 23% do total de



energia para manutenção. Isso porque os tecidos viscerais como os do trato gastrointestinal e fígado apresentam maior renovação protéica que o músculo esquelético (SILVA *et al.*, 2002).

Outro fator que afeta as exigências de manutenção é a idade do animal. O metabolismo em jejum decresce com a idade em uma taxa de 8% ao ano, chegando à estabilização aos seis anos de idade. Assim sendo, aos seis anos o metabolismo basal será 16% do valor inicial. Devido às diferenças na composição corporal em função do sexo dos animais, normalmente são utilizadas correções para a condição sexual, sendo que é considerado que os machos inteiros apresentam metabolismo basal 15% maior que as fêmeas e machos castrados (CNCPS-S, 2004; NRC, 2006; CSIRO, 2007).

Também tem sido observado influência do nível de consumo nas exigências de  $EM_m$ , a qual está em função da taxa metabólica dos órgãos e tecidos, devido as alterações no fluxo sanguíneo, oxigenação do fígado, transferência dos nutrientes do lúmen do intestino, turnover de proteína, transporte de íons de sódio-potássio e outros processos vitais (CSIRO, 2007).

### **2.5.2. Nível de alimentação (L)**

Nível de alimentação é definido como a quantidade de alimento consumido dividido pela quantidade necessária quando a retenção de energia é igual à zero, isto é a quantidade necessária à manutenção (BLAXTER, 1962).

## **2.6. Energia Líquida**

A terceira perda de energia seria o Incremento Calórico, que é a perda energética na forma de calor inerente a metabolizabilidade dos nutrientes (BAUMAN *et al.*, 1985). Subtraindo-se o incremento calórico da Energia Metabolizável tem-se a Energia Líquida, que é efetivamente a energia disponível para o animal produzir.

Parte da Energia Líquida vai para o metabolismo basal do animal, responsável pela manutenção da temperatura corporal, potencial de membranas e renovação de macromoléculas conhecida como Energia Líquida de Manutenção ( $EL_m$ ). A outra parte da energia seria a responsável pela produção animal, denominada Energia Líquida de

Produção ou Energia Retida ( $EL_g$ ), usada para diferentes funções fisiológicas, tais como: ganho de peso, lactação e gestação (MEDEIROS, 2006).

## 2.7. Dinâmica do alimento no rúmen

Os sistemas digestivos dos ruminantes estão bem adaptados para a utilização da fibra insolúvel em detergente neutro (FDN) por fermentação microbiana e o estômago especializado dos ruminantes é composto de quatro compartimentos (rúmen, retículo, omaso e abomaso). A fermentação da fibra ocorre nos primeiros três compartimentos em um ecossistema complexo que é influenciado pela interação entre alimentos, as populações microbianas e o animal hospedeiro. O rúmen e o retículo formam uma grande câmara de fermentação (até 20% do peso corporal) contendo uma população microbiana ativa e diversa. A degradação física de partículas de grandes dimensões para pequenas partículas por mastigação durante a ingestão e ruminação é uma parte importante do processo de digestão em ruminantes. Um pH ótimo para a fermentação microbiana de carboidratos fibrosos é mantido pelo fluxo salivar contínuo e absorção de ácidos graxos voláteis (AGV) produzidos durante a fermentação. O papel do omaso, que é mais desenvolvido em bovinos do que em ovinos, não é completamente compreendido. Parece estar relacionado com a retenção, absorção e seleção de partículas da dieta no rúmen. Em bovinos, o omaso pode ter um papel mais importante na digestão da FDN do que os intestinos (SEJRSEN, 2008).

Os conhecimentos atuais dos padrões cinéticos dos nutrientes no rúmen baseiam-se nas observações de Wilkins (1969), ao verificar que certa quantidade de celulose permanecia indegradável após sete dias de incubação ruminal, resultando assim no desdobramento conceitual da celulose em duas frações: uma potencialmente degradável e outra indegradável (WALDO, 1970, citado por MERTENS, 1993). Waldo *et al.* (1972) relacionaram as taxas de degradação e de passagem desses componentes com o efeito de repleção ruminal (RR), sendo este fator determinante do consumo (VIEIRA *et al.*, 1997a). A repleção ruminal é a expressão do tempo que o alimento permanece no rúmen, sofrendo os efeitos físicos de passagem, decorrentes da mastigação durante a ruminação e da digestão pelos microrganismos do rúmen (VAN SOEST, 1994), portanto é uma importante medida mecanicista utilizada para

avaliar o efeito da fibra e suas frações sobre a retenção da digesta no rúmen (VIEIRA *et al.*, 1997a).

Os carboidratos solúveis, como  $\beta$ -glucanos e pectinas, são prontamente degradados no rúmen e apenas pequenas partes vão escapar para a digestão pós-ruminal, exceto amido como o milho que é lentamente degradável. Quando escapam da degradação ruminal os carboidratos mais solúveis são digestíveis tanto no intestino delgado como no intestino grosso. Carboidratos fibrosos são geralmente insolúveis, lentamente degradados no rúmen, e, portanto a extensão da digestão é altamente dependente do tempo de retenção da fibra no rúmen. A retenção do alimento no trato digestório permite a relação simbiótica entre o animal e os microrganismos, utilizando-se este último como substrato para crescimento (FAVORETO, 2008).

A taxa de passagem refere-se ao escape de resíduos não digeridos e digeridos através do trato gastrointestinal. O escape inclui a fibra indigestível, bactérias e outras frações não degradadas do alimento, devendo ser ressaltado que a composição da dieta (VAN SOEST, 1994; BÜRGER *et al.*, 2000), animal e as condições climáticas (FAICHNEY, 1993) são as variáveis que influenciam a passagem da digesta. Os fatores dietéticos incluem o consumo voluntário, a quantidade e a forma física da fibra (MERTENS, 1977).

A lenta taxa de passagem da digesta pelo rúmen-retículo de animais alimentados com forragem de baixa qualidade tem sido atribuída a partículas grandes, com pequena probabilidade de escape do rúmen-retículo (HUNGATE, 1966; KENNEDY e MURPHY, 1988). Assim, a quebra das partículas da fibra deve ocorrer até que atinjam tamanhos e densidade que lhes possibilitem passar no orifício retículo-omasal. A degradação física das forragens ingeridas pelos ruminantes, em fragmentos cada vez menores, dá-se pela combinação dos eventos: mastigação inicial durante a ingestão; mastigação durante a ruminação; fricção devido à movimentação da digesta e digestão microbiana (FAICHNEY, 1986, citado por FONTES *et al.*, 2001).

A digestão dos nutrientes no trato gastrointestinal (TGI) é um processo dependente do tempo e, dessa forma, a taxa de digestão de um componente dietético, relativa à sua taxa de passagem, é um fator crítico que afeta a digestibilidade. Nutrientes não fibrosos, por apresentarem elevada taxa de digestão ruminal, são pouco afetados quanto à digestibilidade, pela variação na taxa de passagem, enquanto os fibrosos tendem a ser grandemente afetados pela variação na taxa de passagem, uma vez que apresentam lenta taxa de digestão (Mertens, 1993;). A

proporção de um nutriente que se torna disponível para absorção é determinada pela taxa de digestão em relação à velocidade de passagem. A taxa de digestão da fibra em relação à passagem é muito lenta, em comparação com compostos solúveis o que explica a maior variabilidade na digestibilidade da parede celular. Como a digestão da fibra solúvel e insolúvel é exclusivamente dependente da fermentação microbiana, não haverá condições para digestão no intestino delgado, no entanto a fibra que escapa da digestão no rúmen pode ser degradada no intestino posterior.

Se a taxa de passagem é um fator limitante no desaparecimento de material no rúmen (ULYATT *et al.*, 1986), o entrelaçamento das partículas que constituem a malha filtrante do rúmen ou *raft* pode também assumir papel importante neste processo. Segundo Sutherland (1988), citado por Thiago e Gill (1990), essa malha filtrante funcionaria como uma espécie de peneira, que selecionaria partículas em movimento no rúmen, e sua formação dependeria da relação entre o tamanho e a densidade das partículas que constituem a digesta e, conseqüentemente, do tempo após a alimentação e do tipo de forragem ingerida. Além disto, a presença do *raft* é também uma necessidade para manutenção normal das funções do rúmen, através da estimulação tátil de seu epitélio.

O conhecimento da dinâmica de fluxo da digesta é de fundamental importância em modelos de nutrição de ruminantes, que almejem acuradas predições de relacionamentos de dietas, suprimento de nutriente e específico desempenho animal (OFFER *et al.*, 2000). Sua importância é grande, principalmente para definição de estratégias alimentares e para obtenção de suporte quantitativo para os estudos de nutrição (UDÉN *et al.*, 1982).

### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. **Energy and protein requirements of ruminants**. Cambridge University Press, 1993, 159p.

AGRICULTURAL AND FOOD RESEARCH COUNCIL – AFRC. The nutrition of goats. 1998, 116p.

AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL (ARC). **The nutrient requirements of ruminant livestock**. London: ARC, 1980. 351 p.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTRY - AOAC. **Official methods of analysis**. 15.ed. Arlington: AOAC International, 1990. 1117p.

AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL- ARC (Londres, Inglaterra). The nutrient requirements of ruminant livestock. Farnham Royal : CAB, 1980

BALDWIN, R.L.; DONOVAN, K.C. Modelling the lactating dairy cow. In: THEODOROU, M. K.; FRANCE, J. (Eds). **Feeding systems and feed evaluation models**. Wallingford: CAB International, 2000. p. 323-342.

BLAXTER, K.L. The Energy Metabolism of Ruminants. Hutchinson & Co., Ltd., London. pp. 187, 169, 1962.

- BÜRGER, P.J.; PEREIRA, J.C.; COELHO DA SILVA, J.F. *et al.* Taxas de passagem e cinética da degradação ruminal em bezerros holandeses alimentados com dietas contendo diferentes níveis de concentrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, n.1, p.225-235, 2000.
- BURROUGHS, W.; NELSON, D. K.; MERTENS, D. R. Evaluation of protein nutrition by metabolizable protein and urea fermentation potential. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 58, p. 611-219, 1975a.
- CABRAL, L.S.; NEVES, E.M.O.; ZERVOUDAKIS, J.T. Estimativas dos requisitos nutricionais de ovinos em condições brasileiras. **Revista Brasileira de Saúde Produção Animal**, v.9, n.3, p. 529-542, 2008.
- CANNAS, A.; ATZORI, A. S. Development and evaluation of a model to predict sheep nutrient requirements and feed utilization. **Italian Journal of Animal Science**, Bologna, v. 4, suppl. 1, p. 15-33, 2005.
- CANNAS, A.; TEDESCHI, L.O.; FOX, D.G.; PELL, A.N.; VAN SOEST, P.J.A mechanistic model for predicting the nutrient requirements and feed biological values for sheep. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 82, n. 1, p. 149-169, 2004.
- COELHO SILVA, J.F.; LEÃO, M.I. **Fundamento de nutrição de ruminantes**. Piracicaba: Livroceres, 1979. 384 p.
- COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION - CSIRO PUBLISHING. Nutrient requirements of domesticated ruminants. Collingwood, Australia. 2007. 270p.
- CONRAD, H.R., PRATT, A.D., HIBBS, J.W. Regulation of feed intake in dairy cows.I.Changes in importance of physical and physiological factors whit increasing digestibility.J. Dairy Sci., v.42, p.54-62, 1964.

- DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. **Modeling and methodology in animal science**. In: DANFAER, A.; LESCOAT, P. (Eds.) **FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON MODELING NUTRIENT UTILIZATION IN FARM ANIMALS**, 1995, Foulum. Proceedings..., Foulum, Denmark: National Institute of Animal Science, 1995, p. 9-18.
- FAICHNEY, G.J. Digesta flow. In: FORBES, J.M.; FRANCE, J. **Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism**. Commonwealth Agricultural Bureaux, Cambridge University Press, England, 1993. p.53-85.
- FAVORETO, M.G., DERESZ, F., FERNANDES, A.M. *et al.* Avaliação nutricional da grama-estrela cv. Africana para vacas leiteiras em condições de pastejo. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.2, p.319-327, 2008.
- FONTES, C.A.A.; ALVES, G.R.; PAULINO, M.F. *et al.* Influência do nível de consumo sobre a degradabilidade das partículas e características ligadas à cinética ruminal, em novilhos pastejando capim-elefante. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.30, n.6, p.2134-2144, 2001.
- FOX, D.G., SNIFFEN, C.J.; O'CONNOR., J.D. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: III. Cattle requirements and diet adequacy. **Journal of Animal Science**, v.70, n. 12, p. 3578-3596, 1992.
- GOERING, H. K. and VAN SOEST, P.J. Forage Fiber Analysis (apparatus, reagents, procedures and some applications). USDA Agricultural Handbook n.379, 1970.
- GROVUM, W.L. Appetite, palatability and control of feed intake. In: CHURCH, D.C. (Ed.) **The animal digestive physiology and nutrition**. New Jersey: Prentice Hall, 1988. p.202-216.
- HUNGATE, R.E. **The rumen and its microbes**. New York, Academic Press, 1966. 533p.

- KLEIBER, M. The fire of life an introduction to animal energetics. 2nd. ed. New York, Robert E. Krieger Publishing Company, 1975. 453 p.
- KENNEDY, P.M.; MURPHY, M.R. The nutritional implications of differential passage of particles through the ruminant alimentary tract. **Nutrition Research Reviews**, v.1, n.1, p.189-208, 1988.
- LAWRENCE, T.L.J.; FOWLER, V.R. **Growth of farm animals**. CAB International 1997, 321p.
- MAFF, U.K. **Tables of the nutritive value and chemical composition of Foodstuffs**. In:Givens,D.I. (ed.) Rowelt Research Services, Aberdeen, UK.1990.
- MAYNARD, L.A., J.K. LOOSLI, H.F. HINTZ e R.G. WARNER. **Animal Nutrition**. Seventh ed. McGraw Hill Book Company. 1979. p.602.
- MCLEOD, M.N., MINSON D.J., The accuracy of the pepsin—cellulase technique for estimating the dry matter digestibility in vivo of grasses and legumes. **Animal Feed Science and Technology**. n 3, p. 277–287, 1978.
- MEDEIROS, S.R. 2006. **Valor nutricional dos alimentos**. Curso Agripoint Consultoria Ltda. Disponível em: <[www.beefpoint.com.br](http://www.beefpoint.com.br)> Acesso em: março de 2011.
- MERTENS, D.R. Principles of modeling and simulation in teaching and research. **Journal of Dairy Science**, v. 60, n. 7, p. 1176-1186, 1976.
- MERTENS, D.R. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. **Journal Animal Science**, Savoy, v.64, n.6, p.1548-1558, 1987.
- MERTENS, D.R. Dietary fiber components: relationship to the rate and extent of ruminal digestion. **Federation Proceedings**, v.36, n.2, p.187-192, 1977.



- MERTENS, D.R. **Rate and extent of digestion.** In: FORBES, J.M.; FRANCE, J. Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism. CAB International, Cambridge, 1993. p.13-51.
- MERTENS, D.R.; LOFTEN, J.R. The effect of starch on forage fiber digestion in vitro. **Journal of Dairy Science**, v.63, n.9, p. 1437-1446, 1980.
- MERTENS, D.R. **Using neutral detergent fiber to formulate dairy rations and estimate the net energy content of feeds.** In: CORNELL NUTR. CONF. Cornell, USA, 1983. p.60-8.
- MERTENS, D.R. **Kinetics of cell wall digestion and passage in ruminants.** In: JUNG, H.G., BUXTON, D.R., HATIFIELD, R. D. *et al.* (Eds.) Forage cell wall structure and digestibility. Madison: America Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1993. p.535-570
- MONTGOMERY, M.J., BAUMGARDT, B.R. Regulation of food intake in ruminant. 1. Pelleted rations varying in energy concentrations. **J. Dairy Sci**, v.48, p.568-74, 1965.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC.. **Nutrient Requirements of Dairy Cattle.** 6 ed. rev. ed. Washington, DC: National Academy Press. 1989.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. **Nutrients requirements of beef cattle.** 7. ed. Washington, DC: National Academy Press, 1996, 242 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. **Nutrient requeriments of dairy cattle.** 7.rev.ed. Washinton, D.C.: 2001. 381p.
- NATIONAL RESEARCH CONCIL - NRC. **Nutrient requirement of beef cattle.** 7.rev. ed. National Academy Press, D.C.: 2000. 42p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. Nutrient requirements of small ruminants. 2006, 362p.

- OFFER, N.W., DIXON, J. Factors affecting outflow rate from the reticulo- rumen. **Nut. Abs. e Rev.** (Series B), v.70, n.11, p.833-844, 2000.
- ROCHA JUNIOR, V.R.; VALARARES FILHO, S.C.; BORGES,A.M. *et al.* Estimativa do valor energético dos alimentos e validação das equações propostas pelo NRC (2001). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, n.2, p.480-490, 2003b.
- RUSSEL, J.B.; J.D. O'CONNOR, D.G.; FOX, P.J.; VAN SOEST, C.J.; SNIFFEN. A net carbohydrate and protein system for evaluation cattle diets: ruminal fermentation. **Journal of Animal Science**, v.70, n.12, p.3551-3581, 1992.
- RUSSELL, J.B. Minimizing ruminant nitrogen losses. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia / Simpósio Internacional de Nutrição de Ruminantes, 29, 1992, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 1992, p.47-64.
- RUSSELL, J. B. **Rumen microbiology and its role in ruminant** nutrition Ithaca, NY, 2002, 119p.
- SALVADOR,F.A. **Desempenho e digestibilidade em ovinos da raça santa inês alimentados em diferentes condições de balanços de proteína degradável no rúmen e proteína metabolizável.** 2007. 135 p. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.
- SANTOS. F.A.P. **Metabolismo de proteínas.** In; BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. de.(Ed.) Nutrição de ruminantes. Jaboticabal: FUNEP, 2006, p. 255-286.
- SEAL , C.J.; REYNOLDS,C.K. . Nutritional implications of gastrointestinal and liver metabolism in ruminants. **Nutrition Research Reviews**. v.6, p.185–208, 1993.
- SILVA, J.F.C.; LEÃO, M.I. **Fundamentos de nutrição dos ruminantes.** Piracicaba: Livroceres, 1979. 380p.

- SILVA, F.F.; VALADARES FILHO, S.C.; ÍTAVO, L.C. *et al.* Consumo, desempenho, características de carcaça e biometria do trato gastrintestinal e dos órgãos internos de novilhos nelore recebendo dietas com diferentes níveis de concentrado e proteína. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n. 4, p.1849-1864, 2002.
- SEJRSEN, K., HVELPLUND, T., NIELSEN, M.O. **Ruminant physiology**: digestion, metabolism and impact of nutrition on gene expression, immunology and stress. Wageningen Academic Publisher. The –Netherlands,2008. 591.
- SNIFFEN, C.J., J.D. O'CONNOR, P.J. VAN Soest, D.G. Fox, J.B. Russel. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II Carbohydrate and Protein Availability. **Journal Animal Science**, v. 70, p. 3562-3577, 1992.
- SNIFFEN, C.J.; ROBINSON, P.H. Protein and fiber digestion, passage and utilization in lactating cows: microbial growth and flow as influenced by dietary manipulations. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 70, n. 2, p. 425-441, 1987.
- THIAGO, L.R.L.S.; GILL, M. **Consumo voluntário: fatores relacionados com a degradação e passagem da forragem pelo rúmen**. Campo Grande, EMBRAPA-CNPGC, 1990. 65p. (EMBRAPA-CNPGC. Documentos, 43).
- TILLEY, J.M.A.; TERRY, R.A. A two-stage techniques for digestion of forage crops. *Journal of the British Grassland Society*. v. 18, p.104-111, 1963.
- UDÉN, P.; ROUNSAVILLE, R.T.; WIGGANS, G.R.; VAN SOEST, P. J. The measurement of liquid and solid digesta retention in ruminants, equines and rabbits given timothy (*Phleum pratense*) hay. **British Journal of Nutrition.**, v. 48, n.2, p. 329-339, 1982.
- ULYATT, M.J.; DELLOW, A.J.; JOHN, A. *et al.* **Contribution of chewing during eating and rumination to the clearance of digesta from the ruminoreticulum**. In: MILLIGAN, L.P.; GROVUN, W.L.; DOBSON, A. (Ed.). Control of digestion and metabolism in ruminants. Reston, Reston Publishing, 1986. p.498-515.

- VAN SOEST, P.J. 1994. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2.ed. Ithaca: Cornell University Press. 476p.
- VIEIRA, R.A.M.; PEREIRA, J.C.; MALAFAIA, P.A.M. *et al.* The influence elephant-grass (*Pennisetum purpureum* Schum., Mineiro variety) growth on the nutrient kinetic in the rumen. **Animal Feed Science and Technology**, v.67, p.151-161, 1997.
- WALDO, D.R.; SMITH, L.W.; COX, E.L. Model of cellulose disappearance from the rumen. **Journal of Dairy Science**, v.55, n.1, p. 125-129, 1972.
- WEISS, W.P.; CONRAD, H.R.; PIERRE, N.R. St. A theoretically- based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. **Animal Feed Science Technology**, v.39, p.95-110, 1992.
- WEISS, W.P. Predicting energy values of feed. In. Symposium: prevailing concepts in energy utilization by ruminants. **Journal Dairy Science**, v.76, p.1802-1811, 1993.
- WEISS, W.P. Estimating the availability energy content of feeds for dairy cattle. Symposium: energy availability. **Journal Dairy Science**, v.81, p.830-839, 1998.
- WOOLFORD, M.K. **The silage fermentation**. New York: Marcel Dekker, 1984.

## CAPÍTULO 1

O capítulo a seguir corresponde a um artigo integrante desta dissertação submetido como manuscrito ao jornal científico *Small Ruminant Research* (ISSN: 0921-4488) e, como tal sua redação e edição foram preparadas segundo as normas deste periódico, normas estas constantes na página do mesmo na rede mundial de computadores conforme o endereço a seguir:

[www.elsevier.com/locate/smallrumres](http://www.elsevier.com/locate/smallrumres)

cujo acesso se deu em 10 de março de 2012.

1 **Intake and digestibility of major nutrients by wethers as functions of the plane of nutrition**  
2 **in nonlinearly balanced diets constrained to constant metabolizabilities**

3

4 Júlia Gazzoni Jardim<sup>1</sup>, Ricardo Augusto Mendonça Vieira<sup>2,#</sup>, Alberto Magno Fernandes<sup>2</sup>,  
5 Leonardo Siqueira Glória<sup>1</sup>, Nardele Moreno Rohem Júnior<sup>2</sup>

6

7 <sup>1</sup>Graduate Program in Animal Science (GPAS), UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil.

8 <sup>2</sup>Laboratório de Zootecnia e Nutrição Animal, Universidade Estadual do Norte Fluminense  
9 Darcy Ribeiro (UENF), Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil.

10 #Corresponding author: UENF/CCTA/LZNA, Av. Alberto Lamego, 2000, Campos dos  
11 Goytacazes, RJ, Brazil, CEP 28013-602. E-mail: ramvieira@uenf.br.

12

13 **Abstract**

14 The purpose of this study was to evaluate the effect of the plane of nutrition ( $L$ ) on intake  
15 and digestibility of dry matter (DM), organic matter (OM), crude protein (CP), crude fat  
16 (CF), non fibrous carbohydrates (NFC), neutral detergent fiber (NDF) and metabolizability  
17 ( $q_m$ ) of diets using sheep as an experimental model. Absolute amounts (J or  $\text{g}/\text{kg}^{3/4}/\text{d}$ )  
18 were expressed in italics, e.g.,  $CP$ , and concentrations (g/kg) using normal capital letters  
19 within square brackets, e.g., [CP]. Two balanced four-treatments Latin squares were  
20 conducted simultaneously with four multiples of maintenance levels:  $ME = M_m; 1.5M_m;$   
21  $2M_m; 2.5M_m$ , being  $ME$  the metabolizable energy intake and  $M_m$  the metabolizable energy  
22 intake for maintenance. Eight wethers were randomly assigned as columns in two  
23 simultaneous four periods Latin squares. The metabolizable energy ( $ME$ ), metabolizable  
24 energy for maintenance ( $M_m$ ), metabolizable protein ( $MP$ ) intake and neutral detergent  
25 fiber (NDF) were subjected to nonlinear constraints and treated as a general nonlinear

26 programming problem by using Microsoft® Excel® Solver® with the Newton's method of  
27 resolution chosen. The intake of nutrients, digestible nutrients, digestible energy ( $DE$ ) and  
28 the amounts of feces and urine produced daily were measured and analyzed by a mixed  
29 linear model. The corrected metabolizability ( $q'_m$ ) and plane of nutrition ( $L_c$ ) were  
30 obtained on the basis of the digestible, urinary and simulated methane losses. Some  
31 variables had their trends reanalyzed by regressing observed values against  $L_c$ . All  
32 variables analyzed were affected by  $L$  excepting  $q'_m$ . Orts increased significantly as the  $L$   
33 increased. The [CP] content of the Orts was unaffected by  $L$  ( $P=0.152$ ). The same  
34 happened for fecal [DM], [CP], [CF], and [NDF] contents, with P-values of 0.747, 0.079,  
35 0.072, and 0.379, respectively. The fecal contents of [Ash] and [NFC] varied according to  $L$   
36 in a quadratic fashion ( $P=0.021$  and  $P=0.047$ , respectively). The urinary nitrogen content  
37 and the urinary energy content were not affected by  $L$  ( $P = 0.414$  and  $P = 0.304$ ,  
38 respectively). The amount of urinary dry matter excreted daily was unaffected by  $L$   
39 ( $P = 0.618$ ), and the general mean was  $5.1 \pm 1.2 \text{ g/kg}^{3/4}/\text{d}$ . The intakes of dry matter and  
40 organic matter increased in an asymptotic fashion as  $L_c$  increased. Immediately below  
41 maintenance observed values were approximately constant. Digestible amounts eaten  
42 increased linearly above maintenance. The mean energy metabolizability of the diets  
43 computed from tabular metabolizable energy values might be biased and underestimated  
44 to some extent.

45

46 **Keywords:** Nonlinear optimization; ruminants; intake; digestibility.

47

## 48 1. Introduction

49 During the last 200 years much knowledge has been produced regarding the  
50 nutrition and feeding of domesticated ruminants. And much information about nutrient

51 However, there is a need for evaluating theories built throughout the past regarding the  
52 feeding practice of ruminants. There are systematic errors in nutrition models regarding  
53 digestibility and nutritive value of diets that urge identification for further improvements  
54 (Joyce et al., 1975; Vieira et al., 2008). The constraints related to fiber intake capacity and  
55 the required minimum amount of fiber have to be incorporated into current feeding  
56 systems in association with energy and protein constraints (Vieira et al., 2008; Henrique  
57 et al., 2011). Obviously, studies have to encompass measurements to evaluate  
58 performance predictions (Henrique et al., 2005; 2011; Tedeschi et al., 2008; 2012), but  
59 little information can be drawn from such studies about systematic errors on digestibility  
60 of nutrients. The predictions based on the feeding systems need to be checked and  
61 contrasted to observed data under controlled feeding experiments. Therefore, the  
62 behavior of nutrient intake and digestibility are the first step to evaluate whether these  
63 variables are predictable according to underlying theories upon which models such as the  
64 AFRC (1993) were built.

65         The minimum cost formulation based on linear programming has been used as a  
66         practical tool for feeding farm ruminants. However, new data handling tools  
67 became available since the work of Lasdon et al. (1978), who presented a generalized  
68 reduced gradient code for nonlinear programming. As computer hardware and software  
69 powers increased, personal computers and commercial spreadsheets disseminated  
70 worldwide. Therefore, the nonlinear optimization of diets became possible to be ad hoc  
71 programmed by using current feeding systems for ruminants such as the AFRC (1993).  
72 Surprisingly, after searching in the Web of Science<sup>SM</sup> (access on April 19th, 2012) we did  
73 not find records for the combine topics “nonlinear optimization and diets and ruminants”.  
74 Nonetheless, it is to our knowledge that a complex model relating nutrient requirements  
75 and feed nutritive values have been professionally programmed using nonlinear



76 optimization for feeding dairy cattle (Tedeschi et al., 2008). The spreadsheet solution is  
77 more tedious as a programming tool than professionally programmed software, but  
78 spreadsheets are widely available and the building of the constraints is a rather simple  
79 and logical programming task. Our goal in the present study was measuring intake and  
80 digestibility of major nutrients by sheep using minimum cost diets subjected to nonlinear  
81 constraints regarding plane of nutrition and constant metabolizabilities of the dietary  
82 energy and protein according to the AFRC (1993) feeding system.

83

## 84 **2. Material and methods**

85 Two balanced four-treatments Latin squares (Lucas, 1957) were conducted  
86 simultaneously from April 12<sup>th</sup> to July 8<sup>th</sup> of 2011. Treatments were four levels for the  
87 plane of nutrition ( $L$ ) as multiples of maintenance, i.e.  $L = ME/M_m$  as defined in the AFRC  
88 (1993). The metabolizable energy supplied by the diet and the metabolizable energy  
89 required for maintenance correspond to  $ME$  and  $M_m$  (MJ/d), respectively. The four levels  
90 were planned as follows:  $ME = M_m$ ;  $ME = 1.5M_m$ ;  $ME = 2M_m$ ; and  $ME = 2.5M_m$ .

91 The experimental diets were based on corn silage as the single forage source. The  
92 ensiled herbage mass was harvested from a 1.3 ha corn crop area (21°42'35" S and  
93 41°20'20" W; 14 m of altitude) containing Xanthic and Eutrophic Oxisols with 10%  
94 declivity, and located in the county of Campos dos Goytacazes, Northern Rio de Janeiro  
95 State, Brazil. The corn seeds were sown by direct planting in the fall of 2010 and harvested  
96 with approximate dry matter (DM) content of 330 g/kg of fresh forage. The corn field was  
97 systematically irrigated once to twice a week for approximately 100 d and harvested from  
98 the 118<sup>th</sup>–122<sup>nd</sup> days after planting.

### 99 *2.1. Animals, feeding, and duration of the experiment*

100 Eight F1 Dorper  $\times$  Santa Inês wethers weighing approximately 38.7 kg (SD = 2.8  
101 kg) at the beginning of the experiment were randomly assigned as columns in the Latin  
102 squares. Animals were a priori deverminated and kept individually in metabolism cages  
103 with free access to water and fed the diets of the treatment levels accordingly during the  
104 course of the experiment.

105 Wethers were fitted with harnesses and feces collection bags at the beginning  
106 and throughout the four Latin square periods. The periods lasted 22 d divided into an  
107 adaptation period of 15 d followed by a seven days collection period. Food offered and  
108 refused, as well as feces and urine were collected on a daily basis during the collection  
109 period. After collection, daily samples were composited for each animal related to the  
110 respective treatment  $\times$  period interaction. Urine was collected twice a day (morning and  
111 evening) in 5,000 mL plastic pots containing 50 mL of 1.2 M HCl.

112 Animals were fed twice a day at 08:00 am and 04:00 pm. Orts were collected before  
113 each meal. Feces were collected at 09:00 am during the collection period. The weight of  
114 the animals was recorded at the first and the 22nd day of each Latin square period and an  
115 average weight was computed for each period.

## 116 *2.2. Formulating the experimental diets*

117 The maintenance requirements of the sheep were computed according to AFRC  
118 (1993). The problem of formulating different diets for multiples of maintenance (Eq. (2))  
119 was modeled as a general nonlinear programming problem. The problem was  
120 programmed by using Microsoft Excel Solver<sup>®</sup> with the Newton's method of resolution as  
121 originally proposed by Lasdon et al. (1978). The majority of notations containing in the  
122 AFRC publication was retained in the present work. The objective function is shown by Eq.  
123 (1), which contains the individual costs ( $c_j$ , \$/kg) of an unknown  $x_j$  quantity of the  $j$ -th  
124 feedstuff (as fed, kg/d). The constraints are shown by Eqs. (2)–(10).

$$\min \sum_j c_j x_j, \text{ subjected to:} \quad \text{Eq. (1)}$$

$$125 \quad L = 1, 1.5, 2, \text{ or } 2.5; \quad \text{Eq. (2)}$$

$$126 \quad \Delta W \geq 0; \quad \text{Eq. (3)}$$

$$127 \quad q_m = 0.55; \quad \text{Eq. (4)}$$

$$128 \quad 0 \leq Urea \leq 40 \text{ g/d/kg } W; \quad \text{Eq. (5)}$$

$$129 \quad ME = LM_m; \quad \text{Eq. (6)}$$

$$130 \quad MP = 6.5LM_m; \quad \text{Eq. (7)}$$

$$131 \quad [\text{peNDF}] \geq 200 \text{ g/kg DM}; \quad \text{Eq. (8)}$$

$$132 \quad NDF \leq 12W; \quad \text{Eq. (9)}$$

$$133 \quad x_j \geq 0. \quad \text{Eq. (10)}$$

134       The plane of nutrition was set as previously described and a solution was obtained  
 135 for each planned  $L$ . The daily liveweight gain ( $\Delta W$ , g/d) was loosely set. The  
 136 metabolizability of the diets ( $q_m = [ME]/18.8$ , dimensionless) was held constant for all  
 137 planned  $L$ . The metabolizable energy of the diet was computed as follows:  $M/D =$   
 138  $(\sum_j [\text{DM}]_j [ME]_j x_j) / (\sum_j [\text{DM}]_j x_j)$ . The amount of diet DM to be offered (DM, kg/d) was  
 139 computed as  $\sum_j 0.001 [\text{DM}]_j x_j$ . The metabolizable energy provided by the offered diet  
 140 ( $ME$ , MJ/d) was equal to  $\sum_j 0.001 [\text{DM}]_j [ME]_j x_j$ . The dry matter ( $[\text{DM}]_j$ , g/kg as fed) and  
 141 metabolizable energy contents ( $[ME]_j$ , MJ/kg DM) as well as other chemical constituents  
 142 of the  $j$ -th feedstuffs used as inputs to the problem are shown in Table 1. By constraining  
 143 diets to a constant metabolizable protein ( $MP$ , g/d) to  $ME$  ratio (g/MJ), and by fixing exact  
 144 values for  $L$  (Eq. (2)), both the supplied  $ME$  and  $MP$  of the diet became functions of  $M_m$  as  
 145 shown by Eqs. (6)–(7). The constants 0.55 (Eq. (4)) and 6.5 (Eq. (7)) were the lowest  
 146 values used as inputs that resulted in viable solutions for the nonlinear problem in the  
 147 planned  $L$  range. The amount of urea ( $Urea$ , g/d) was set to an upper limit to avoid

148 intoxication (Eq. (5)). The fiber-related constraints (Eq. (8)–(9)) were added to the  
149 original AFRC equations. The fibrous content of the  $j$ -th feedstuff ([NDF], g/kg DM) as well  
150 as its physically effective fiber factor (pef, dimensionless) are shown in Table 1. The  
151 content of physically effective fiber ([peNDF]) was set to a minimum required amount to  
152 avoid rumen dysfunction as suggested by the NRC (2001) and shown by Eq. (8). In  
153 addition, the maximum intake capacity was set to 12 g/kg  $W/d$  as the maximum intake  
154 capacity of fiber (Mertens, 1987; Vieira et al., 2008), which was shown by Eq. (9). The  
155 amount of fiber offered (NDF, g/d) was defined as  $10^{-6} \sum_j [DM]_j [NDF]_j x_j$ . The fiber  
156 contents of the  $j$ -th feedstuffs ([NDF] $_j$ , g/kg DM) are also presented in Table 1.

### 157 *2.3. Chemical analyses of the diets, orts, feces, and urine*

158 The offered and refused diets, feces, and urine were collected and the fresh weight  
159 was recorded to the nearest 0.005 kg. Samples of the offered diets, orts, and feces were  
160 dried at 55 °C for 72 h in a forced air oven. Individual samples of the offered and refused  
161 diets, and feces were composited on the basis of the air dried weight. The composite  
162 samples of the offered and refused diets, and feces were ground through a 5 mm screen in  
163 a Wiley mill and stored. Samples of approximately 0.1 kg of the stock samples were  
164 ground through a 1 mm screen for chemical analyses. Urine samples were composited by  
165 taking 20% of the amount of urine produced each day of the experimental period. The  
166 composite urine samples were freeze-dried.

167 Samples of diets, orts, and feces were analyzed for dry matter ([DM], AOAC 967.03;  
168 AOAC, 1990) and expressed as g/kg as is, and crude fat ([CF], AOAC 2003.06; Thiex et al.,  
169 2003), and [ash] (AOAC 942.05; AOAC, 1990) contents (g/kg DM). The crude protein  
170 ([CP], g/kg DM) content was obtained by digesting samples (0.25 g) with 5 mL of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
171 and 1 g of a 56:1 mixture of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and Cu<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O in 100 mL tubes using aluminum  
172 digestion blocks according to the guidelines outlined in method AOAC 984.13 and method

173 AOAC 2001.11, including N recovery with certified  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  and lysine-HCl (AOAC,  
 174 1990; Thiex et al., 2002). The insoluble fiber content ([NDF], g/kg DM) was assayed with  
 175 sodium sulfite and two additions of a standardized solution of heat-stable amylase, and  
 176 with ashes excluded according to method AOAC 2002.04 (Mertens, 2002). The neutral  
 177 detergent solubles ([NDS], g/kg DM) and non-fibrous carbohydrates ([NFC], g/kg DM)  
 178 were estimated with the following equations:  $[\text{NDS}] = 1000 - [\text{NDF}]$  and  $[\text{NFC}] = 1000 -$   
 179  $[\text{CP}] - [\text{CF}] - [\text{ash}] - [\text{NDF}]$ . The freeze-dried urine samples were analyzed for [CP]  
 180 (AOAC, 1990; Thiex et al., 2002), and the energy content was determined as the heat of  
 181 combustion in a constant volume bomb calorimeter (Parr Instrument Company, Moline,  
 182 USA).

#### 183 2.4. Computing contents and amounts

184 The apparent digestible energy content ( $[DE]$ , MJ/kg) of the consumed diets was  
 185 estimated by accounting for the energetic equivalents of the digestible amounts of protein  
 186 (23.4 MJ/kg), carbohydrates (17.6 MJ/kg), and fat (39.3 MJ/kg) according to the NRC  
 187 (2001), as follows:

$$188 \quad DE \text{ (MJ/d)} = 17.6(\text{NFC}_d + \text{NDF}_d) + 23.4\text{CP}_d + 39.3\text{CF}_d; \quad \text{Eq. (11)}$$

$$189 \quad \forall \text{Nut}_d \text{ (kg/d)} = \text{Nut}_{offer} - \text{Nut}_o - \text{Nut}_{feces}; \quad \text{Eq. (12)}$$

$$190 \quad [DE] \text{ (MJ/kg)} = DE / \text{DMI}. \quad \text{Eq. (13)}$$

191 The actual dry matter intake ( $\text{DMI}$ , kg/d) of the diets was computed as follows:

192  $\text{DMI} = 0.001(\sum_j [\text{DM}]_j x_j - [\text{DM}]_o O)$ . The amount of daily orts ( $O$ , kg/d), the DM content  
 193 of the orts ( $[\text{DM}]_o$ , g/kg DM), and the fecal DM produced daily ( $R$ , kg/d) were used to  
 194 calculate  $D$ , i.e., the intake of digestible DM ( $D$ , kg/d) computed as  $\text{DMI} - R$ . The digestible  
 195 amount of a specific nutrient ( $\text{Nut}$ ), namely NFC, NDF, CF, Ash, or CP, was denoted as  $\text{Nut}_d$   
 196 and its concentration in the diet was denoted as  $[\text{Nut}_d]$ . For any given  $\text{Nut}$ , the individual  
 197 components of Eq. (12) were computed as follows:  $\text{Nut}_{offer} = 10^{-6} \sum_j [\text{DM}]_j [\text{Nut}]_j x_j$ ;

198  $Nut_o = 10^{-6}[DM]_o[Nut]_oO$ ; and  $Nut_{feces} = 0.001[Nut]_{feces}R$ . The amount of a given  
 199 nutrient in the fecal DM was also denoted as  $R_{Nut}$  (kg/d). A given  $Nut$  intake was  
 200 calculated as  $Nut_{offer} - Nut_o$ . Moreover, the digestibilities of the consumed diet DM and  
 201 of a specific  $Nut$  were determined as follows:

$$202 [D](g/kg DM) = 1000D/DMI; \quad \text{Eq. (14)}$$

$$203 [Nut_d](g/kg Nut) = 1000 Nut_d/(Nut_{offer} - Nut_o). \quad \text{Eq. (15)}$$

204 The daily urinary energy ( $UE$ , MJ/d) and the estimated daily methane energy<sup>1</sup> ( $E_g$ ,  
 205 MJ/d)(Blaxter and Clapperton, 1965) were discounted from  $DE$  to yield the apparent  
 206 metabolizable energy intake ( $ME$ , Eq. (15)), and the metabolizable energy content ( $[ME]$ ,  
 207 Eq. (16)) of the diet was computed accordingly:

$$208 ME(MJ/d) = DE - UE - E_g; \quad \text{Eq. (15)}$$

$$209 [ME](MJ/kg DM) = ME/DMI. \quad \text{Eq. (16)}$$

210 The planned plane of nutrition ( $L$ ) and diet metabolizability ( $q_m$ ) were corrected  
 211 according to the observed measures of apparent digestibility and metabolizability of the  
 212 diets. Therefore, the corrected plane of nutrition ( $L_c$ ) and metabolizability of the diets  
 213 ( $q'_m$ ) were computed on the basis of the apparent metabolizable energy of the diets  
 214 actually consumed. In this regard, taking the results from Eq. (15)–(16), we computed  $L_c$   
 215 and  $q'_m$  as follows:  $L_c = ME/M_m$ , and  $q'_m = [ME]/18.8$ .

## 216 2.5. Statistical analysis

217 The intake of nutrients, digestible nutrients, digestible energy, and the amounts of  
 218 feces and urine produced daily were scaled to the metabolic body size, i.e., by dividing the  
 219 respective intake or amount excreted by  $W^{3/4}$  (g or kJ/kg<sup>3/4</sup>/d). The amount of fiber  
 220 intake was scaled to  $W$  (g/kg/d). The linear mixed model as shown by Eq. (17) was fit to

---

<sup>1</sup> Although calculations made by Blaxter and Clapperton (1965) were correct, their equation was printed incorrectly. It can be easily demonstrated that, on their terms,  $CH_4 = 1.30 + 0.112D + L(2.37 - 0.050D)$

221 the scaled variables after logarithmic transformation. However, the estimates of the  
 222 variabls were presented in its scaled form, i.e., g or kJ/kg<sup>3/4</sup>/d. The following linear mixed  
 223 statistical model was adopted (Tempelman, 2004):

$$224 \quad Y_{ikl} = \mu + \alpha_i + s_k + \beta_l + \alpha\beta_{il} + e_{ikl}. \quad (\text{Eq. 17})$$

225  $Y_{ikl}$  is the observation related to the variable measured in the  $k$ -th sheep fed to the  $i$ -th  
 226 plane of nutrition during the  $l$ -th period. The fixed effects in Eq. (17) are the mean ( $\mu$ ), the  
 227 plane of nutrition ( $\alpha_i$ ), the period for the two simultaneous balanced Latin squares ( $\beta_l$ ),  
 228 and the treatment by period interaction ( $\alpha\beta_{il}$ ). The random effects are sheep ( $s_k$ ) and the  
 229 usual error term ( $e_{ikl}$ ). The statistical model was fitted using the PROC MIXED procedure  
 230 of SAS (version 9; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) with maximum likelihood as the  
 231 estimation method. The repeated command was used with  $s_k$  as subjects. The variance-  
 232 covariance matrix was modeled as variance components, compound symmetry, first order  
 233 auto-regressive correlations, and as the unrestricted variance-covariance structure (Littell  
 234 et al., 2006). The likelihood of the different variance-covariance structures was assessed  
 235 by the Akaike information criterion (Akaike, 1974; Burnham and Anderson, 2004). The  
 236 corrected Akaike Information criterion is actually a SAS output as Eq. (17) was fitted with  
 237 different variance-covariance structures. In sequence, the likelihoods of the different  
 238 structures were compared as suggested by Vieira et al. (2012). All computed information  
 239 criteria were also used to check the likelihood of Eq. (17) fitted with or without the  $\alpha\beta_{il}$   
 240 term, and by introducing treatment grouping in the repeated sentence of the SAS program  
 241 to check the homocedasticity assumption (Littell et al., 2006). Null hypotheses regarding  
 242 treatments and their linear, quadratic, and cubic effects were rejected for  $P < 0.05$ .

243 For significant regressions, the estimated 95% confidence intervals (95%CI) were  
 244 presented as follows:  $\hat{y}_L \pm (Ur - Lr)/2$ ; where  $\hat{y}_L$  is the predicted dependent variable for  
 245 a given  $L$ ; and  $Ur$  and  $Lr$  are the upper and lower limits, respectively, of the 95%CI. Given

246 the absence of treatment effects, the general mean ( $\bar{y}$ ) of the dependent variable was  
 247 provided as a 95%CI:  $\bar{y} \pm (Ur - Lr)/2$ .

248 Trends were reanalyzed by regressing observed values of some variables against  
 249 the corrected plane of nutrition ( $L_c$ ). Some variables exhibit curvilinear behaviors as  
 250 functions of  $L_c$  in an asymptotic fashion. Other variables presented linear behaviors.  
 251 However, both behaviors presented an initial phase near maintenance in which an average  
 252 response was followed by the respective curvilinear or linear ascending behavior above  
 253 maintenance. For this reason we adopted two models to describe the possible  
 254 relationships as follows:

255 If  $\min L_c < L_c \leq L'$  then  $y = \bar{y}_0$ ; for  $L_c > L'$ ,  $y = A - B \exp(-kL_c)$  Eq. (19)

256 If  $\min L_c < L_c \leq L'$  then  $y = \bar{y}_0$ ; for  $L_c > L'$ ,  $y = a + bL_c$  Eq. (20)

257 The minimum (min)  $L_c$  was taken as the lowest inferable  $L_c$  value within the maintenance  
 258 range. The parameter  $\bar{y}_0$  was the mean of the observations that did not differ within the  
 259 maintenance range defined by its upper limit  $L'$ . For Eq. (19), parameter  $A$  is the  
 260 asymptotic response for a given  $y$ ,  $B$  is a scale parameter, and the rate of increase in  $y$   
 261 reduces asymptotically at an exponential rate  $k$  for  $L_c > L'$ . The intercept  $a$  can be  
 262 excluded from Eq. (20) to yield a no intercept model as a possible alternative chosen on  
 263 the basis of its likelihood. The regression coefficient corresponds to the unit increase in  
 264 the dependent variable for a unit increase in  $L_c$  above  $L'$ . The dependent variables ( $y$ )  
 265 were scaled to  $W$  and Eqs. (19)–(20) were fit to data by means of the iteratively  
 266 reweighted nonlinear least squares of the PROC NLIN procedure (SAS, version 9). The sum  
 267 of squares of the errors computed with the robust algorithm was used to compute the  
 268 Akaike criterion and the likelihoods of the two models as suggested by Vieira et al. (2012).  
 269 No inferences were drawn above the maximum or below the minimum observed  $L_c$   
 270 values.



### 271 3. Results

272 The fit of the different variance-covariance structures revealed that variance  
273 components was the best choice among the structures for all dependent variables  
274 analyzed by fitting Eq. (17) to data.

275 The liveweight of the animals ( $W$ ) was affected by the plane of nutrition and period  
276 of the Latin square. However, despite significant, the cubic effect related to the plane of  
277 nutrition ( $L^3$ ) was difficult to explain and this behavior was ignored (Table 2). By taking  
278 the significant  $L^2$  effect, the estimated  $W$  for  $L = 1, 1.5, 2,$  and  $2.5$  were  $40.1 \pm 2.0,$   
279  $45.3 \pm 1.6, 46.0 \pm 1.6,$  and  $42.1 \pm 2.0$  kg, respectively, whereas the least squares means for  
280 periods one, two, three and four were 44.9, 42.6, 41.8, and 44.3, respectively, with 1,6 kg  
281 as a common error for periods. Therefore, liveweights peaked for treatments between  
282 1.5 $\times$  and 2 $\times$  maintenance, while average liveweights differed only between periods 1 and  
283 3.

284 All variables presented in Table 2 were affected by the planned plane of nutrition,  
285 excepting the corrected metabolizability of the diet ( $q'_m$ ). The corrected plane of nutrition  
286 ( $L_c$ ) increased linearly with the planned plane of nutrition ( $L$ ). The significant cubic effect  
287 regarding the organic matter intake ( $OM$ ) was disregarded. The quadratic effect of the  
288 plane of nutrition ( $L^2$ ) over  $DMI$  and  $NDS$  was evidence of an asymptotic behavior.  
289 Excepting the linear increase in the fecal crude protein ( $R_{CP}$ ) and ash ( $R_{Ash}$ ), the amounts  
290 of fecal dry matter ( $R$ ) and fecal nutrients ( $R_{CF}, R_{NDF}, R_{NFC},$  and  $R_{NDS}$ ) varied according to  
291  $L^2$  resembling an asymptotic behavior (Table 2).

292 Table 3 contains the offered, refused, fecal and digestible amounts produced daily  
293 and scaled to the metabolically effective body size of the wethers ( $W^{3/4}$ ), as well as  
294 digestibility coefficients of the diets. There were no orts at the maintenance level, but orts  
295 increased significantly as  $L$  increased ( $P = 0.011$ ) in a quadratic fashion ( $P = 0.017$ ).

296 Nonetheless, the refused amounts were close to zero at 1.5× and 2× maintenance. The  
297 amount of offered DM varied because it was scaled to  $W^{3/4}$  but this was not the case for  
298 nutrient contents within the same offered diet, what explains why we did not present  
299 error estimates for the composition of the offered diets. The [CP] content of the diets was  
300 unaffected by  $L$  ( $P = 0.152$ ). The same happened for the fecal [DM], [CP], [CF], and [NDF]  
301 contents ( $P = 0.747, 0.079, 0.072, \text{ and } 0.379$ , respectively). The fecal [Ash] and [NFC]  
302 contents varied according to  $L^2$  ( $P = 0.021$  and  $P = 0.047$ , respectively). The [DM<sub>d</sub>], [CP<sub>d</sub>],  
303 [CF<sub>d</sub>], [NDF<sub>d</sub>], and [NFC<sub>d</sub>] were affected by  $L$  in a quadratic fashion and the corresponding  
304  $P$ -values were 0.003, 0.019, 0.008, 0.008, and 0.018, respectively. The digestibility of the  
305 ashes increased linearly as  $L$  increased ( $P = 0.002$ ).

306         The plane of nutrition did not affect the urinary nitrogen content expressed as g/kg  
307 of the daily mass of urine produced ( $P = 0.414$ ), as well as the urinary energy content  
308 expressed as J/g of freeze-dried urine mass ( $P = 0.304$ ). The 95%CI estimate for the  
309 former variable was  $2.4 \pm 0.6$  g/kg of fresh urine mass, and for the latter variable was  
310  $1424 \pm 125$  J/g. The amount of urinary dry matter excreted daily was unaffected by  $L$   
311 ( $P = 0.618$ ), and the 95%CI was  $5.1 \pm 1.2$  g/kg<sup>3/4</sup>/d. Despite the errors involved, there  
312 was a significant linear increase in the crude protein intake (Table 2), i.e.,  $1.4 \pm 0.3$ ,  
313  $1.7 \pm 0.5$ ,  $2.0 \pm 0.8$ , and  $2.4 \pm 1.3$  g/kg<sup>3/4</sup>/d, respectively for  $L = 1, 1.5, 2, \text{ and } 2.5$ .  
314 However, the urinary nitrogen excretion (UN, g/kg<sup>3/4</sup>/d; Table 2) was relatively  
315 unaffected because the cubic effect was unlikely to explain the variation. Ignored the cubic  
316 effect, there remained a significant single linear effect in the daily urinary nitrogen  
317 excretion and the estimated amounts excreted were  $0.4 \pm 0.1, 0.5 \pm 0.1, 0.6 \pm 0.1, \text{ and}$   
318  $0.7 \pm 0.2$  g/kg<sup>3/4</sup>/d for  $L = 1, 1.5, 2, \text{ and } 2.5$ , respectively. The urinary energy excretion  
319 did not follow the same trend and was unaffected by the plane of nutrition (Table 2), and

320 the least squares means for  $L = 1, 1.5, 2,$  and  $2.5$  were  $28.4 \pm 9.6, 25.2 \pm 8.7, 22.8 \pm 8.4,$   
 321 and  $37.2 \pm 12.6$  kJ/kg<sup>3/4</sup>/d, respectively.

### 322 3.1. Corrected metabolizability and plane of nutrition

323 Some variables were estimated as functions of the corrected plane of nutrition  
 324 (Figure 1). First,  $q'_m$  and  $L_c$  were plotted against  $L$  (panels (a) and (b) of Figure 1).  
 325 Although constancy for  $q'_m$  was achieved in the optimized diets (Table 2), the planned  
 326 metabolizability ( $q_m = 0.55$ , Eq. (4)) was below the 95%CI for the mean  $q'_m$  (Figure 1a).  
 327 The logarithmic transformation implies linearization of the dependent variable. Therefore,  
 328 the estimated regression in the original scale demands that predictions are based on the  
 329 following expression:  $\hat{y} = \exp(\hat{a} + \hat{b}x)$ . This explains the curvilinear behavior presented  
 330 (Figure 1b). Nonetheless, a no intercept linear model (not shown in Figure 1) was  
 331 considered the best choice to represent data because the ratio computed from the  
 332 likelihood probabilities ( $0.624/0.268 \cong 2$ ) indicated that the linear model (likelihood in  
 333 the denominator) was only two times worse than the exponential one. Therefore, the  
 334 resulting expression taken for inference purposes was the simpler no intercept model, i.e.,  
 335  $\hat{L}_c = \hat{b}L$ , with  $\hat{b} = 0.97 \pm 0.04$ .

336 The intakes of dry matter (*DMI*, Figure 1c) and organic matter (*OM*, Figure 1d)  
 337 increased in an asymptotic fashion as  $L_c$  increased. Immediately below maintenance,  
 338 however, observed values were approximately constant. These equations were rather  
 339 descriptive and extrapolating inferences for  $L_c$  values below 0.8 or above 2.9 should be  
 340 avoided.

341 The intakes of digestible dry matter (*D*, Figure 1c), digestible organic matter (*D<sub>om</sub>*,  
 342 Figure 1d), digestible energy (*DE*, Figure 1e), and neutral detergent fiber (*NDF*, Figure 1f)  
 343 increased linearly above maintenance. A segmented linear model was necessarily used to  
 344 describe the observed behaviors because below maintenance intakes were constant. The

345 results depicted in Figure 1 within the 0.8–2.9  $L_c$  range appeared to be highly predictable,  
346 with only a few outliers detected.

347

#### 348 **4. Discussion**

349 The traditional Latin square design has been analyzed by assuming the  
350 nonexistence of  $\alpha\beta_{il}$  and other interactions (Lucas, 1957; Neter and Wasserman, 1974;  
351 Littell et al., 2006). Although present originally in Eq. (17) as suggested by Tempelman  
352 (2004), the model without the interaction term was fitted with greater likelihood (see  
353 section 2.2) to all dependent variables studied. The investigation of the possible variance-  
354 covariance structures (Littell et al., 2006) based on likelihood calculations (see section  
355 2.2) revealed that errors were uncorrelated, i.e., no covariances or correlations among  
356 measurements in the same sheep across periods were likely to have occurred for the  
357 variables measured in the present study.

358 Operations research deals with the problem of allocating scarce resources and from  
359 this field the idea of diet optimization arose. In this regard, the most common objective  
360 function is the cost of the diet, which has to be minimized (Bazaraa and Shetty, 1979). The  
361 problem of feeding a particular farm animal category relies on situations where resources  
362 are scarce. Therefore, one solution of interest is the controlled feeding system in which the  
363 animal is expected to eat all of an offered diet (Emmans and Kyriazakis, 1995); in our case,  
364 a minimum cost optimized diet. The existence of slightly increasing amounts of orts  
365 indicated that some excess food was offered only at the highest plane of nutrition (Table  
366 3), and the definition of a controlled feeding situation matched.

367 It has long been recognized that the nutritive value of a unit weight of food is not  
368 constant and depends on the amount of the same food eaten, because the greater the food  
369 intake the lower the food utilization (Brody, 1945; Blaxter, 1956; Van Soest and Fox, 1992;

370 Tedeschi et al., 2010). The discounts for net energy and protein are applied for the same  
371 diet fed at multiples of maintenance (Van Soest and Fox, 1992), and obviously  
372 metabolizability ( $q_m$ ) is expected to decline. Therefore, given the dependence of the  
373 nutritive value of the diet on intake rate, we kept the metabolizability constant (Table 2)  
374 to check the ability of the optimization tool in providing predictable amounts of nutrient  
375 intake and digestibilities (Figure 1) according to the current theories underlying the  
376 feeding of ruminants using sheep as a model. The nonlinear constraints used (Eqs. (6)–  
377 (8)) are more natural, because true energy and protein values of the diet are essentially  
378 nonlinear, and the main advantage of the nonlinear optimization resides in the freedom  
379 and flexible way constraints can be built. There is no need for linearization or  
380 transformations of any kind and constraints can be programmed as originally conceived.

381 In the AFRC publication a good estimate of the voluntary food intake of the animal,  
382 as well as estimates of the net energy contents for maintenance and production of the  
383 selected feedstuffs are required for linear programming (AFRC, 1993). Diet, and therefore  
384 its intake, must be an input to the problem and performance is an expected output in  
385 current feeding systems (McDonald et al., 1995; Fox et al., 2004). In the nonlinear  
386 programming problem, however, intake could be treated as an output and performance  
387 can be constrained to a target or desired performance level. In the present work, however,  
388 the liveweight gain ( $\Delta W$ ) was unconstrained in the form of Eq. (3) because our interest  
389 relied on intake and digestibility behaviors, but no inferences were made regarding  $\Delta W$   
390 because short experimental periods in a Latin square hamper valid inferences about  $\Delta W$ .

391 We did not check protein metabolizability of the diets, but the majority of the  
392 protein losses occurred as fecal protein ( $R_{CP}$ , Table 2). The amount of  $R_{CP}$  ( $\text{g/kg}^{3/4}/\text{d}$ ) can  
393 be easily computed from Table 3 as  $R \times \text{fecal [CP]}$ . We expected that urinary energy  
394 excretion was in close agreement with crude protein intake (Brody, 1945), because

395 urinary energy and nitrogen contents are highly correlated (Street et al., 1964). However,  
396 there was only a slightly increase in the daily urinary nitrogen excretion (section 3), i.e.,  
397  $0.1 \text{ g/kg}^{3/4}/\text{d}$  per unit increase in  $L$ , and the daily urinary energy losses ( $\text{kJ/kg}^{3/4}/\text{d}$ )  
398 remained constant (section 3). It is possible that the constant  $MP:ME$  ratio adopted had  
399 favored the protein retention and reduced nitrogen and energy losses (Blaxter, 1966; Fox  
400 et al., 2004). Nevertheless, the observed liveweight changes due to the plane of nutrition  
401 and period effects are hard to explain (section 3). Growth measures are less variable with  
402 longer experimental periods (Eaton et al., 1959). Therefore, measures regarding protein  
403 and energy retention, likewise growth measures, demand continuous, rather than change-  
404 over, trials to check the  $MP:ME$  ratio hypothesis.

405 The  $q'_m$  values were used to compute  $L_c$  values (section 3.1). The respective  
406 observed and predicted values of these two variables were shown in Figure 1, panels a  
407 and b. Apparently, the animal were capable to perform nonlinear adjustments within the  
408 studied range of the planned plane of nutrition (Figure 1b). Nonetheless, as presented in  
409 section 3.1, despite the underprediction of the  $q_m$  values, the 95%CI for the slope of the no  
410 intercept model indicated that the corrected plane of nutrition, as an estimate of the actual  
411 plane of nutrition, was close to the planned levels. The linear no intercept model appears  
412 to yield stronger inferences because intake can be extrapolated to zero, nevertheless,  
413 inferences for  $L_c$  greater than 2.5 might be weak and deserve further investigations.  
414 Blaxter (1956, 1966) and Van Soest (1994) argued that the variations in the energy  
415 utilization of concentrates are lower than forages. Therefore, we believe that the  
416 difference between  $q_m$  from Eq. (4) and  $q'_m$  could be attributed to the  $[ME]$  of the corn  
417 silage. We used a grain producing variety with a shorter height instead of a silage-specific  
418 variety. Therefore, a greater proportion of corn grains (not quantified) and consequently a

419 greater [*ME*] value would be expected in relation to the silage tabular value used (Table  
420 1).

421 The behaviors of intake and digestibilities observed in the present study were  
422 highly predictable (Figure 1). The curvilinear and asymptotic response of the *DMI* and *OM*  
423 were agreeable with current theories regarding intake regulation (Conrad et al., 1964;  
424 Mertens, 1987; Allen, 1996). The chemostatic level of regulation appeared to operate  
425 because intakes of *D*, *DOM*, *DE*, and *NDF* performed by the animals were linear in the  $L_c$   
426 range as shown on panels (c), (d), (e), and (f) of Figure 1. The *NDF* was constrained to a  
427 maximum intake of 12 g/kg *W/d* (Mertens, 1987; Vieira et al., 2008), but this limit was far  
428 from being achieved in the  $L_c$  range studied. Within the observed  $L_c$  range the intake of  
429 digestible nutrients did not reach a plateau yet. According to the biphasic theory, a plateau  
430 would be expected for  $L_c$  values greater than 2.5. Therefore, the segmented linear model  
431 has an intrinsic limited inference and was applied only to demonstrate empirically the  
432 high predictability of the behavior of the variables within the  $L_c$  range studied.

433 An interesting adjustment performed by the animals was the significant linear  
434 effect (Table 2) observed for CP, despite the different [CP] levels in the offered diets.  
435 Pittroff and Kothman (1999) have argued that protein might be the motive by which  
436 animals seek for food. Indeed, there are several metabolite and hormonal candidates as  
437 signals for intake regulation and the biphasic theory of intake regulation (Conrad et al.,  
438 1964) has been criticized (Pittroff and Kothmann, 1999; Pittroff and Soca, 2006). Because  
439 ruminants can be raised in facilities, at pastures, or both, important differences in the  
440 feeding behavior and intake rates may occur (Pittroff and Soca, 2006). The constant MP to  
441 ME ratio maintained across the offered diets allowed predictable responses in terms of  
442 nutrient and digestible nutrient intakes for the controlled feeding situation performed in  
443 the present study. The approach using the nonlinear optimization tool for balancing the

444 diets to be offered based on the simple AFRC (1993) model appeared to work adequately  
445 in a practical feeding situation, because intake and digestibility of major nutrients behave  
446 in accordance to the chemostatic level of intake regulation, at least. However, the  
447 possibility of a circumstantial effect between MP and ME on intake regulation should not  
448 be disregarded.

449

## 450 **5. Conclusions**

451         The intake and digestibility of major nutrients by wethers under controlled feeding  
452 within the range 1.0–2.5× the metabolizable energy requirement at maintenance are  
453 highly predictable if the metabolizability of the dietary energy and the metabolizable  
454 protein to metabolizable energy ratio are kept constant in the dietary constrained  
455 nonlinear optimization problem. Despite the possible underestimation of the mean energy  
456 metabolizability of the diets computed from tabular [ME] values in the present study, the  
457 metabolizability of the dietary energy and the plane of nutrition behaved as planned, and  
458 the AFRC model appears to yield predictable responses about nutrient and digestible  
459 nutrient intakes by sheep under controlled feeding.

460

## 461 **Acknowledgements**

462         This research were supported by the Conselho Nacional de Desenvolvimento  
463 Científico e Tecnológico – CNPq (Brazil), process numbers 303869/2009-7 and  
464 479593/2010-8, respectively, and by the Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à  
465 Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ, process number E-26/110.231/2011. The  
466 first author thanks to Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
467 (CAPES, Brazil) for the fellowship.

468



469 **References**

- 470 AFRC, 1993. Energy and protein requirements of ruminants, CAB International,  
471 Cambridge, UK.
- 472 Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. IEEE Trans. Automat.  
473 Control. 19, 716-723.
- 474 Allen, M.S., 1996. Physical constraints on voluntary intake of forages by ruminants.  
475 J.Anim.Sci. 74, 3063-3075.
- 476 AOAC. 1990. Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, 15th  
477 Edition, Arlington.
- 478 Bazaraa, M. S., Shetty, C. M., 1979. Nonlinear programming: theory and algorithms. John  
479 Wiley & Sons, Inc., Singapore.
- 480 Blaxter, K.L., 1956. The nutritive value of feeds as sources of energy - a review. J.DairySci.  
481 39, 1396-1424.
- 482 Blaxter, K.L., 1966. The energy metabolism of ruminants, Charles C. Thomas, Springfield.
- 483 Blaxter, K.L., Clapperton, J.L., 1965. Prediction of amount of methane produced by  
484 ruminants. Br.J.Nutr. 19, 511-522.
- 485 Brody, S., 1945. Bioenergetics and growth. With special reference to the efficiency complex  
486 in domestic animals, Reinhold Publishing Co., New York.
- 487 Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in  
488 Model Selection. Sociol. Methods & Res. 33, 261-304.
- 489 Conrad, H.R., Hibbs, J.W., Pratt, A.D., 1964. Regulation of feed intake in dairy cows .I.  
490 change in importance of physical + physiological factors with increasing digestibility. J.  
491 Dairy Sci. 47, 54-62.
- 492 Eaton, H.D., Gosslee, D.G., Lucas, H.L., 1959. Effect of duration of experiment on  
493 experimental errors in calf nutrition growth studies. J. Dairy Sci. 42, 1398-1400.

- 494 Emmans, G.C., Kyriazakis, I., 1995. The idea of optimisation in animals: Uses and dangers.  
495 *Livest.Prod.Sci.*44, 189-197.
- 496 Fox, D.G., Tedeschi, L.O., Tylutki, T.P., Russell, J.B., Van Amburgh, M.E., Chase, L.E., Pell, A.N.,  
497 Overton, T.R., 2004. The Cornell Net Carbohydrate and Protein System model for  
498 evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Anim.FeedSci.Technol.* 112, 29-78.
- 499 Henrique, D.S., Lana, R.P., Vieira, R.A.M., Fontes, C.A.A., Botelho, M.F., 2011. A model for  
500 evaluating beef cattle rations considering effects of ruminal fiber mass. *R. Bras. Zootec.* 40,  
501 2538-2547.
- 502 Henrique, D.S., Vieira, R.A.M., Malafaia, P.A.M., Mancini, M.C., Gonçalves, A.L., 2005.  
503 Estimation of the Total Efficiency of Metabolizable Energy Utilization for Maintenance and  
504 Growth by Cattle in Tropical Conditions. *R. Bras. Zootec.* 34, 1006-1016.
- 505 Lasdon, L.S., Waren, A.D., Jain, A., Ratner, M., 1978. Design and testing of a generalized  
506 reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Transactions on Mathematical*  
507 *Software* 4, 34-50.
- 508 Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W., Wolfinger, R.D., Schabenberger, O., 2006. SAS® for  
509 Mixed Models, SAS Institute Inc., Cary, USA.
- 510 Lucas, H.L., 1957. Extra-period latin-square change-over designs. *J.DairySci.* 40, 225-239.
- 511 McDonald, P., Edwards, R.A., Greenhalgh, J.F.D., Morgan, C.A., 1995. Animal nutrition,  
512 Longman Scientific & Technical.
- 513 Mertens, D.R., 1987. Predicting Intake and Digestibility Using Mathematical Models of  
514 Ruminant Function. *J.Anim.Sci.* 64, 1548-1558.
- 515 Mertens, D.R., 2002. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber  
516 in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative study. *J. AOAC International*  
517 85, 1217-1240.

- 518 Neter, J., Wasserman, W., 1974. Applied Linear Statistical Models, Richard D. Irwin, Inc.,  
519 Homewood.
- 520 NRC, 2001. Nutrient requirements of dairy cattle, National Academy of Sciences,  
521 Washington, DC.
- 522 Pittroff, W., Kothmann, M.M., 1999. Regulation of intake and diet selection by herbivores.  
523 In: Jung, H.J.G., Fahey Jr., G.C. (Eds.), Nutritional ecology of herbivores. Proceedings of the  
524 Vth international symposium on the nutrition of herbivores. A.S.A.S., San Antonio, TX, pp.  
525 366-422.
- 526 Pittroff, W., Soca, P. (Eds.), 2006. Physiology and Models of Feeding Behavior and Intake  
527 Regulation in Ruminants.
- 528 Street, J.C., Harris, L.E., Butcher, J.E., 1964. Estimating urine energy from urine nitrogen.  
529 J.Anim.Sci. 23, 1039-1041.
- 530 Tedeschi, L.O., Cannas, A., Fox, D.G., 2010. A nutrition mathematical model to account for  
531 dietary supply and requirements of energy and other nutrients for domesticated small  
532 ruminants: The development and evaluation of the Small Ruminant Nutrition System.  
533 small ruminant res. 89, 174-184.
- 534 Tedeschi, L.O., Cannas, A., Solaiman, S.G., Vieira, R.A.M., Gurung, N.K., 2012. Development  
535 and evaluation of empirical equations to predict ruminal fractional passage rate of forages  
536 in goats. J.Agric.Sci. 150, 95-107.
- 537 Tedeschi, L.O., Chalupa, W., Janczewski, E., Fox, D.G., Sniffen, C., Munson, R., Kononoff, P.J.,  
538 Boston, R., 2008. Evaluation and application of the CPM dairy nutrition model. J.Agric.Sci.  
539 146, 171-182.
- 540 Thiex, N. J., H. Manson, S. Anderson, and J.-Á. Persson. 2002. Determination of Crude  
541 Protein in Animal Feed, Forage, Grain, and Oilseeds by Using Block Digestion with a

- 542 Copper Catalyst and Steam Distillation into Boric Acid: Collaborative Study. Journal of  
543 AOAC International 85: 309-317.
- 544 Tempelman, R.J., 2004. Experimental design and statistical methods for classical and  
545 bioequivalence hypothesis testing with an application to dairy nutrition studies.  
546 J.Anim.Sci.2, E162-E172.
- 547 Van Soest, P.J., 1994. Nutritional ecology of the ruminant, Cornell University Press, Ithaca.
- 548 Van Soest, P.J., Fox, D.G., 1992. Discounts for net energy and protein - fifth revision. In:  
549 Proceedings of the 54<sup>th</sup> Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers. Cornell  
550 University Press, Rochester, NY, pp. 40-68.
- 551 Vieira, R.A.M., Campos, P.R.d.S.S., Silva, J.F.C.d., Tedeschi, L.O., Tamy, W.P., 2012.  
552 Heterogeneity of the digestible insoluble fiber of selected forages in situ.  
553 Anim.FeedSci.Technol.171, 154-166.
- 554 Vieira, R.A.M., Tedeschi, L.O., Cannas, A., 2008. A generalized compartmental model to  
555 estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 2. Integrating digestion and passage. J.  
556 Theor. Biol. 255, 357-368.

**Table 1**Costs (c) and chemical composition<sup>a</sup> of the feedstuffs used as inputs to optimize the treatment diets.

Input <sup>a</sup>	Ingredients			
	Corn Silage	Corn, grounded	Urea	Soyabean meal (BR)
c <sup>ab</sup> , \$/kg	0.12	0.60	1.20	0.60
[DM] <sup>a</sup> , g/kg as fed	360	860	950	890
[NDF] <sup>a</sup> g/kg DM	500	90	—	140
pef <sup>a,f</sup>	0.9	0.34	—	0.23
[ME] <sup>ad</sup> , MJ/kg	9.0	13.8	—	12.6
[FME] <sup>a</sup> , MJ/kg	7.0	12.4	—	12.0
[CP] <sup>a</sup> , g/kg DM	70	102	2600	497
[ADIN] <sup>a</sup> , g/kg DM	1.2	—	—	2.2
a <sup>a</sup> , dmls <sup>c</sup>	0.66	0.26	1.0	0.08
b <sup>a</sup> , dmls <sup>c</sup>	0.19	0.69	—	0.92
k <sub>d</sub> <sup>a</sup> , 1/h	0.20	—	—	0.08
u <sup>ac</sup> , dmls	0.15	—	—	—
[QDP] <sup>a</sup> , g/kg DM	46.2	—	2600	39.8
[SDP] <sup>a</sup> , g/kg DM	12.1	—	—	367.8
[ERDP] <sup>a</sup> , g/kg DM	49.1	2080	—	399.6
[UDP] <sup>a</sup> , g/kg DM	11.7	—	—	89.4
[DUP] <sup>a</sup> , g/kg DM	3.8	46.4	—	68.1

<sup>a</sup> c, feed cost; DM, dry matter; NDF, neutral detergent fiber; pef, physically effective fiber; a, instantly degradable soluble fraction; b, insoluble potentially degradable fraction; k<sub>d</sub>, fractional degradation rate of b; u, unavailable protein fraction; ME, metabolizable energy; FEM, fermentable metabolizable energy; CP, crude protein; ADIN, acid detergent insoluble nitrogen; QPD, quickly degradable protein; UDP, undegradable protein; SDP, slowly degradable protein; ERDP, effective rumen degradable protein.

<sup>b</sup> Monetary units per kg of the feedstuff as fed. Prices taken on March of 2011 when R\$1,00 (Brazilian currency) =US\$0.60.

<sup>c</sup> Dimensionless.

<sup>d</sup> Estimate based on tabulated Brazilian values.

**Table 2**  
P-values related to the measured variables.

Variable <sup>a</sup>	P-values				
	Treatment	Period	Linear	Quadratic	Cubic
$W^a$ , kg	<0.001	0.028	0.103	<0.001	0.008
$DMI^b$	<0.001	0.072	<0.001	<0.001	0.410
$CP^b$	<0.001	0.249	<0.001	0.896	0.104
$CF^b$	<0.001	0.549	<0.001	0.370	0.168
Ash <sup>b</sup>	<0.001	0.022	<0.001	0.310	0.505
$NDF^b$	<0.001	0.241	<0.001	0.558	0.476
$NFC^b$	<0.001	0.040	<0.001	0.001	0.967
$NDS^b$	<0.001	0.194	<0.001	<0.001	0.775
$R^c$	<0.001	0.890	<0.001	0.001	0.113
$R_{CP}^c$	<0.001	0.071	<0.001	0.111	0.358
$R_{CF}^c$	0.001	0.744	0.001	0.006	0.980
$R_{Ash}^c$	<0.001	<0.001	<0.001	0.486	0.511
$R_{NDF}^c$	<0.001	0.965	<0.001	0.002	0.066
$R_{NFC}^c$	<0.001	0.028	<0.001	0.004	0.600
$R_{NDS}^c$	<0.001	0.687	<0.001	0.003	0.296
[UN] <sup>d</sup>	0.414	0.004	0.486	0.397	0.405
[UN] <sup>e</sup>	0.004	0.104	0.014	0.272	0.003
UE <sup>d</sup>	0.304	0.600	0.915	0.474	0.127
UE <sup>e</sup>	0.260	0.006	0.442	0.357	0.486
$D^b$	<0.001	0.141	<0.001	0.390	0.112
$DE^b$	<0.001	0.919	<0.001	0.382	0.418
$q'_m{}^a$	0.258	0.340	0.692	0.152	0.229
$L_G^a$	<0.001	0.049	<0.001	0.642	0.420
OM <sup>ab</sup>	<0.001	0.093	<0.001	0.143	0.016
$D_{om}{}^{ab}$	<0.001	0.119	<0.001	0.465	0.141
[D <sub>om</sub> ] <sup>a</sup>	0.012	0.746	0.669	0.002	0.450

<sup>a</sup>  $W$ , live weight; and the dimensionless variables:  $q'_m$ , corrected metabolizability;  $L_G$ , corrected plane of nutrition; and [D<sub>om</sub>], coefficient of digestibility of the organic matter.

<sup>b</sup> Intakes of dry matter ( $DMI$ ), crude protein ( $CP$ ), crude fat ( $CF$ ), ash ( $Ash$ ), neutral detergent fiber ( $NDF$ ), non-fibrous carbohydrates ( $NFC$ ), neutral detergent soluble ( $NDS$ ), digestible dry matter ( $D$ ), digestible energy ( $DE$ ), organic matter ( $OM$ ), and digestible organic matter ( $D_{om}$ ), all expressed as g or kJ/kg<sup>3/4</sup>/d.

<sup>c</sup> Amounts of fecal dry matter ( $R$ ), crude protein ( $R_{CP}$ ), crude fat ( $R_{CF}$ ), ash ( $R_{Ash}$ ), neutral detergent fiber ( $R_{NDF}$ ), non fibrous carbohydrates ( $R_{NFC}$ ), and neutral detergent solubles ( $R_{NDS}$ ), all expressed as g /kg<sup>3/4</sup>/d.

<sup>d</sup> Urine nitrogen (UN, g/kg) and urine energy (UE, J/g).

<sup>e</sup> UN, g /kg<sup>3/4</sup>/d, and UE, g /kg<sup>3/4</sup>/d.

**Table 3**

Amounts<sup>a</sup> of dry matter (DM) offered to, refused, feces produced, and digested by F1 Dorper × Santa-Inês wethers, as well as chemical constituents<sup>b</sup> of the offered, refused, fecal and digested DM for each plane of nutrition (*L*).

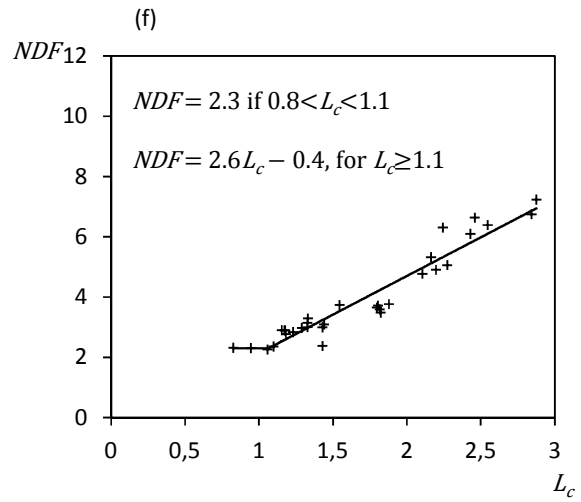
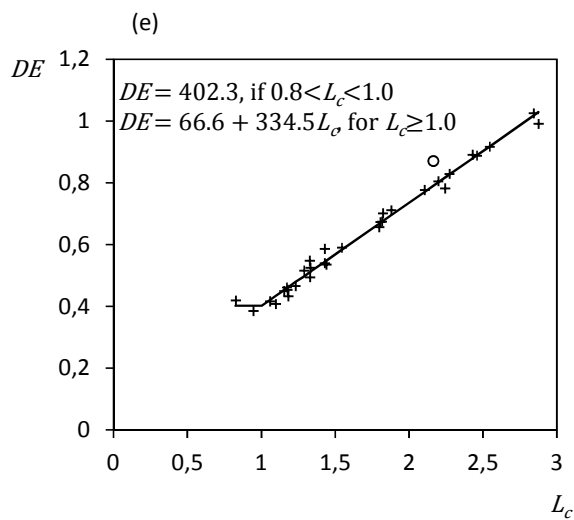
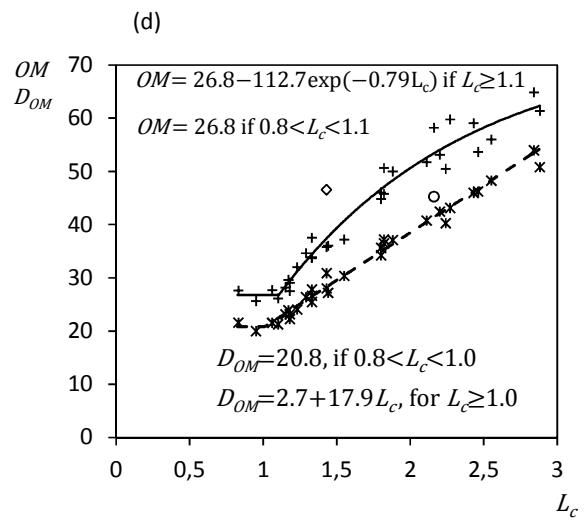
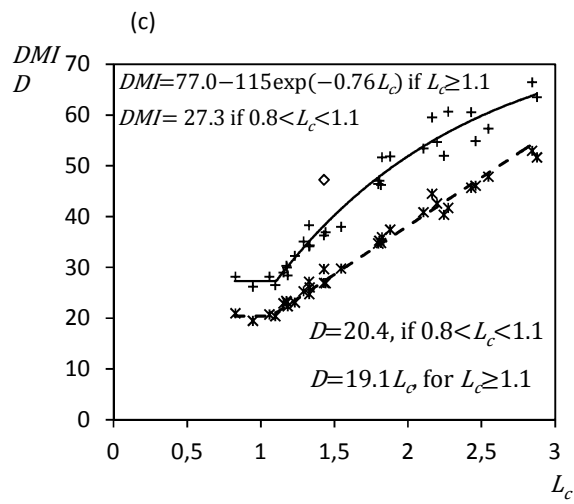
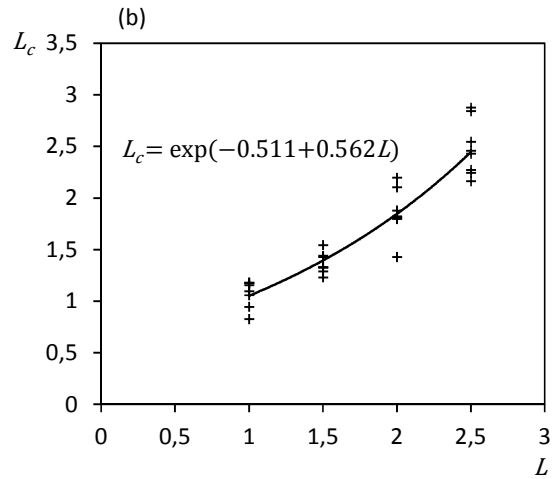
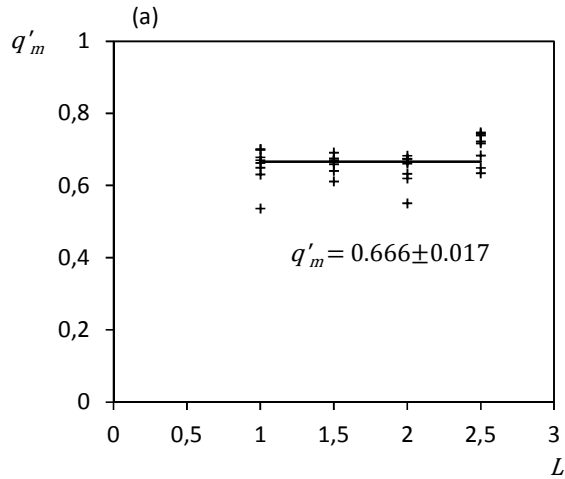
Plane of Nutrition	DM <sup>c</sup>	[DM] <sup>d</sup>	[CP] <sup>d</sup>	[CF] <sup>d</sup>	[Ash] <sup>d</sup>	[NDF] <sup>d</sup>	[NFC] <sup>d</sup>
Offered	26.8±1.6	374.1	171.9	54.9	63.0	350.2	364.3
	39.1±1.1	364.6	197.6	50.4	58.0	357.9	339.7
	51.5±1.1	364.1	127.4	48.7	65.8	334.0	427.4
	63.8±1.6	362.3	148.8	53.0	63.2	360.9	377.5
Refused	—	—	—	—	—	—	—
	2.5±4.1	174.5±152.5	41.6±12.9	18.0±18.0	26.2±18.7	42.0±33.0	198.2±174.2
	3.5±4.1	303.7±76.3	41.6±12.9	27.7±9.2	52.6±11.8	95.3±20.7	346.8±87.2
	12.2±4.1	432.8±3.8	41.6±12.9	37.4±9.4	79.1±18.7	148.7±33.0	495.4±21.3
Feces	6.4±1.4	357.1±2.8	145.7±7.9	35.1±2.6	167.2±17.0	519.8±11.0	129.4±26.3
	10.3±1.1	357.1±2.8	145.7±7.9	35.1±2.6	138.4±12.9	519.8±11.0	166.2±20.1
	12.6±1.1	357.1±2.8	145.7±7.9	35.1±2.6	130.1±13.0	519.8±11.0	175.5±20.0
	13.3±1.4	357.1±2.8	145.7±7.9	35.1±2.6	142.3±17.0	519.8±11.0	157.1±26.3
Digested	20.1±2.1	765.4±25.6	771.1±27.9	838.0±31.1	364.5±71.9	663.2±47.3	912.4±26.3
	28.5±1.3	730.2±19.5	746.2±21.3	797.5±23.7	391.8±54.7	595.9±36	877.0±20.0
	36.9±1.3	734.9±19.5	737.6±21.2	810.1±23.7	443.4±54.7	605.6±36	873.0±20.0
	45.3±2.1	779.6±25.6	745.4±27.9	876.0±31.1	519.4±71.9	692.4±47.3	900.3±26.3

<sup>a</sup> Estimates without errors are analytical results for the offered DM. Other estimates are 95% confidence intervals for each *L*.

<sup>b</sup> CF, crude fat; CP, crude protein; NFC, non fibrous carbohydrates; NDF, neutral detergent fiber assayed with amylase and Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> and expressed exclusive of residual ash.

<sup>c</sup> g /kg<sup>3/4</sup>/d.

<sup>d</sup> g/kg DM.





**Figure 1**

Trends observed for some variables as functions of the planned plane of nutrition ( $L$ ) and corrected plane of nutrition ( $L_c$ ). On panel (a) observed (+) and predicted (solid line)  $L_c$  values are plotted against  $L$ . On panel (b) the corrected observed (+) and predicted (solid line) metabolizability ( $q_m$ ) are plotted against  $L$ . On panel (c) are plotted the observed dry matter intake ( $DMI$ , +), the predicted  $DMI$  values (solid line), the observed digestible dry matter intake ( $D$ , \*) and the respective predicted values (dashed line) and outliers for  $DMI$  ( $\diamond$ ) and  $D$  ( $\circ$ ). On panel (d) is shown the observed (NDF, +) and predicted (solid line) insoluble fiber intake. On panel (e) are plotted the organic matter (OM, +) and digestible organic matter ( $D_{OM}$ , \*) intakes, the predicted values for OM (solid line) and  $D_{OM}$  (dashed line), as well as the OM ( $\diamond$ ) and  $D_{OM}$  ( $\circ$ ) outliers. On panel (f) are depicted the observed (+) and predicted (solid line) digestible energy intake ( $DE$ ).