

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO

NARDELE MORENO ROHEM JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS E DE
MARCADORES PARA PREDIÇÃO DA MASSA RUMINAL DE
FIBRA E DA DIGESTÃO DA FIBRA EM BOVINOS**

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

ABRIL DE 2016

NARDELE MORENO ROHEM JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS E DE
MARCADORES PARA PREDIÇÃO DA MASSA RUMINAL DE
FIBRA E DA DIGESTÃO DA FIBRA EM BOVINOS**

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

**ORIENTADOR: PROF. RICARDO AUGUSTO MENDONÇA
VIEIRA**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL DE 2016**

AVALIAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS E DE MARCADORES PARA PREDIÇÃO DA MASSA RUMINAL DE FIBRA E DA DIGESTÃO DA FIBRA EM BOVINOS

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência Animal.

Aprovada em 15 de abril de 2016

Comissão Examinadora:

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

Dr. Tadeu Silva de Oliveira (D. Sc., Zootecnia) - UENF
(Co-orientador)

Dr. Leonardo Siqueira Glória (D. Sc., Genética e Melhoramento)
(Co-orientador)

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

Os sonhos e o trabalho

“Você não precisará de sonhos para ser um trabalhador comum, massacrado pela rotina, que faz tudo igual todos os dias e que vive apenas em função do salário no final do mês. Mas precisará de muitos sonhos para ser um profissional que procura a excelência, amplia os horizontes de sua inteligência, fica atento às pequenas mudanças, tem coragem para corrigir rotas, tem capacidade para prevenir erros, tem ousadia para fazer das suas falhas e dos seus desafios um canteiro de oportunidades. Precisarão de sonhos para enxergar soluções que ninguém vê, para apostar naquilo que crê, para encantar seus colegas, para surpreender sua equipe de trabalho.”

(Augusto Cury)

AGRADECIMENTOS

Início meus agradecimentos com um agradecimento especial aos meus pais Nardele Moreno Rohem e Maria do Carmo Rosalino Gualberto Rohem por serem os maiores incentivadores nos momentos conturbados.

Aos meus irmãos Anderson Gualberto Rohem e Raquel Gualberto Rohem agradeço por fazerem parte da minha infância e estarem sempre ao meu lado torcendo e incentivando nas novas etapas da vida.

Ao Matheus Abreu por ser companheiro de tarefas, amigo, conselheiro e orientador. Aproveitando o momento agradeço também a Marcella Radael por sempre permitir minha permanência em sua residência sempre escutando minhas lamentações.

A Aline Matos Arrais por ser precursora desse mestrado. Sei que sua participação foi restrita ao início e fim dessa jornada, mas não tiro seu mérito de ter me convencido que o mestrado seria uma boa escolha, assim como foi. De forma geral obrigado pelos bons e ruins momentos proporcionados, sua participação foi muito relevante nessa conquista.

Ao casal de amigos Ana Kesia e Rafael por serem grandes amigos. A participação de vocês nesses dois anos de mestrado foi crucial.

Aos amigos Ana Kesia, Rafael Freitas, Rafael Mansur, Gilmar, Marcos Aurélio, Natalia, Daniel Pereira, Eliane, Suelen Viana e Mirela Christo por tornarem esses dois anos de mestrado mais agradável.

Aos primos Maycon, Sanya, Guilherme e Tia Sueli por serem grandes companheiros e incentivadores nos momentos de alegrias e de tristeza.

Ao Bernardo Bento Lima de Melo por ter me mostrado os caminhos da Universidade Estadual do Norte Fluminense-Darcy Ribeiro(UENF), por ter me apresentado à zootecnia, por ter me acolhido e encaminhado na minha vida universitária e por ser um amigo e colega de profissão.

Aos amigos de faculdade Yara Lisboa, Rafael Freitas, Uilian Machado, Jefferson, Davi e Carlos Henrique por terem sido além de amigos, grandes colegas de estudo trazendo motivação e perseverança para o decorrer da vida acadêmica.

Ao um casal de amigos Norberto e Tatiana por terem adotados a mim e ao Leonardo como uma família de zootecnistas nos dando muito carinho e bons conselhos.

A UENF por ter me recebido e disponibilizado sua estrutura, espaço físico, laboratórios e suporte para minha formação.

Aos professores por terem me passado todo conhecimento técnico e científico para minha formação profissional.

Ao grupo de pesquisa composto pelos amigos Matheus Lima, Rafael Freitas, Jefferson Tadeu, Carlos Henrique, Davi Barbosa, Flavio Henrique, Marcelo Cabral, Rafael Gomes, Laila, Jhone e Wagner Tamy.

Ao amigo e co-orientador Leonardo Glória, obrigado pelas dicas orientações e ajudas de última hora. Espero ainda usufruir muito dos seus conhecimentos.

Ao meu orientador Ricardo Augusto Mendonça Vieira o qual considero como um amigo por toda orientação, pelos ensinamentos, pela sabedoria transmitida, pelos conselhos, pelas broncas e pelos momentos de raiva proporcionados.

RESUMO

ROHEM JÚNIOR, Nardele Moreno. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Abril de 2016; Avaliação de modelos matemáticos e de marcadores para predição da massa ruminal de fibra e da digestão da fibra em bovinos. Orientador: Professor Ricardo Augusto Mendonça Vieira.

O presente estudo teve a finalidade aferir modelos de predição da quantidade ruminal de fibra e da quantidade diária de fibra digerida com base em parâmetros da cinética de degradação e passagem de partículas fibrosas por meio da comparação entre valores observados e preditos em bovinos. Foram ajustados os modelos monocompartimental (GN) e o de duplo compartimento (GNG1) aos perfis de cinética de trânsito de partículas fibrosas marcadas com os marcadores Cr, Yb, Eu e Y. O modelo GNG1 proporcionou estimativas mais confiáveis quando comparados com o modelo GN nos diferentes marcadores de fibra. Os melhores ajustes para as estimativas de massa ruminal de fibra foram obtidos pelo modelo GNG1 com o marcador Eu. O marcador Cr com o modelo bicompartimental também proporcionou bons ajustes, apresentando comportamento diferente dos demais, onde as estimativas superestimam os valores de massa ruminal de fibra observados. Da mesma forma, para as estimativas da quantidade de massa de fibra digerida, foram obtidos os melhores ajustes com base no modelo bicompartimental ajustado aos perfis de cinética de trânsito do marcador Eu. No entanto, para as estimativas da quantidade de fibra digerida, todas as combinações de perfis de cinética de trânsito ajustadas aos dois modelos apresentaram forte evidência de rejeição da hipótese geral. Os parâmetros estimados com uso do modelo GNG1 ajustado aos perfis de cinética de trânsito obtidos com o indicador Eu são mais confiáveis para a determinação da massa ruminal de fibra. Nesse estudo as estimativas de digestibilidade da fibra não são confiáveis.

Palavras chave: Cinética de trânsito, digestibilidade da fibra, marcadores externos.

ABSTRACT

ROHEM JÚNIOR, Nardele Moreno. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Abril de 2016; Evaluation of mathematical models and markers to predict ruminal fiber mass and fiber digestion in cattle. Advisor: Professor Ricardo Augusto Mendonça Vieira.

The present study aimed to assess the amount of ruminal fiber prediction models and the daily amount of fiber digested based on kinetic parameters of degradation and fibrous particles passing through comparison between observed and predicted values in bovine. The monocompartment (GN) and the bicompartimental (GNG1) models were fitted to fibrous particle transit kinetic profiles marked with markers Cr, Yb, Eu and Y. The GNG1 model provided more reliable estimates when compared with the GN model in the different fiber markers. The best fit for the ruminal mass estimates fiber were obtained by GNG1 model with marker Eu. The Cr marker with the bicompartimental model also provided good fits, presenting different behavior of others, where estimates overstate the ruminal mass values fiber observed. Likewise, for estimating the quantity of fiber mass digested best fits were obtained based on the bicompartimental model fit to the kinetic profiles with the marker Eu. However, for the amount of fiber digested estimates, all combinations transit kinetic profiles fitted to both models showed strong evidence of rejection of the general hypothesis. The parameters estimated with the GNG1 model fitted to transit kinetic profiles obtained with the marker Eu are more reliable for the determination of ruminal fiber mass. In this study the fiber digestibility estimates are unreliable.

Key words: transit kinetics, fiber digestibility, external markers.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 2. OBJETIVO | 11 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 3.1. Fibra na nutrição de ruminantes | 12 |
| 3.2. Estimativas da degradação da fibra no rúmen..... | 15 |
| 3.2.1. Técnicas de degradação <i>in vitro</i> | 17 |
| 3.3. Dinâmica de <i>pool</i> único do conteúdo fibroso no rúmen | 18 |
| 3.4. Dinâmica de <i>pool</i> heterogêneo do conteúdo fibroso no rúmen | 19 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| 4.1. Origem dos Dados e das Amostras..... | 24 |
| 4.1.1. Dados e Amostras para Avaliação do Modelo de Digestibilidade e para as Estimativas da Cinética de Trânsito | 24 |
| 4.1.2. Dados e Amostras para Avaliação do Modelo de Predição da Massa Ruminal de Fibra (Q_{FDN}) | 25 |
| 4.2. Degradação <i>in vitro</i> dos carboidratos fibrosos | 26 |
| 4.2.1. Preparação do meio de cultura para incubação | 27 |
| 4.2.2. Degradabilidade dos carboidratos fibrosos por gravimetria | 28 |
| 4.3. Interpretação cinética dos perfis de degradação gravimétrica da fibra | 29 |
| 4.4. Interpretação cinética dos perfis de excreção dos indicadores complexados à fibra | 30 |
| 4.5. Estimação dos parâmetros de degradação e passagem | 31 |
| 4.6. Cálculo da massa ruminal de fibra $QFDN$ | 33 |
| 4.7. Cálculo da quantidade diária de fibra digerida $DFDN_f$ | 34 |
| 4.8. Avaliação do poder preditivo dos modelos..... | 36 |
| 5. RESULTADOS | 37 |
| 6. DISCUSSÃO | 57 |
| 7. CONCLUSÃO | 65 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 66 |

1. INTRODUÇÃO

Animais ruminantes, em condições naturais, têm como principal alimento as forrageiras. Entretanto, devido à sazonalidade e características fisiológicas das plantas, elas podem apresentar concentrações dos seus componentes variada ao longo do ano (VAN SOEST, 1994), e como consequência, se comportar de maneira desuniforme no trato gastrintestinal (TGI), podendo maximizar ou reduzir o desempenho do mesmo. O rúmen-retículo se comporta como uma câmara de fermentação complexa com conteúdos heterogêneos e estratificados apresentando porções líquida, sólida e gasosa. O conteúdo fibroso e a fase líquida estão sujeitas a constante mistura promovida pela contração dos pilares ruminais e reticulares. A população microbiana é mantida ativa pelo suprimento regular de substrato, e os mecanismos que tornam o rúmen um ecossistema singular são a ruminação, a eructação, o suprimento de saliva, a motilidade e a remoção de produtos finais por assimilação ou passagem (CZERKAWSKI, 1986).

A extensão da digestão microbiana dos carboidratos no rúmen é modulada pela degradabilidade e tempo de permanência do alimento no órgão, (BLAXTER et al., 1956; WALDO et al., 1972), dessa forma a interação entre o desaparecimento por absorção ou passagem, atrelado a mecanismos fisiológicos do animal e condições do ambiente alimentar (Mertens (1987), implica no maior ou menor consumo de alimento. Mertens (1997) propôs um modelo para explicar o desaparecimento da fibra da câmara de fermentação

em ruminantes. O modelo sugere que o consumo máximo de matéria seca, potencialmente digestível, sofre maior influência da qualidade da fibra ingerida e taxa de passagem do que pela taxa de digestão. Estudos citados por Mertens (1997) demonstram ainda que a ingestão de matéria seca (IMS), por vacas leiteiras, tem relação direta com a degradabilidade da FDN. O autor ainda relata que o conteúdo de FDN é o melhor componente do alimento parâmetro estimar a IMS em ruminantes.

Os experimentos de digestão *in vivo*, constituem a forma mais exata para se obter o valor nutritivo dos alimentos. No entanto, apresentam limitações de tempo, mão de obra e grande quantidade do material a ser avaliado, além disso, as variações entre animais são fatores limitantes para a acurácia da técnica. Uma boa alternativa para contornar esses problemas são os estudos de degradabilidade da fibra *in vitro*. Essas técnicas compreendem estudos sobre o desaparecimento da massa do material incubado ao longo do período de incubação (PELL et al., 1994).

As técnicas *in vitro* merecem destaque por apresentarem como vantagens a rapidez e uniformidade físico-química do microambiente de fermentação (MALAFAIA et al., 1998). Quando o objetivo do ensaio é determinar as propriedades intrínsecas do alimento, as condições *in vitro* tem elevada confiabilidade, pois, permitem maior controle do ambiente possibilitando isolar as características de interesse no alimento. No entanto, apesar de serem muito utilizadas, podem apresentar falhas quando extrapoladas para uma condição de rúmen, isso pode ocorrer por mau uso do inóculo ruminal, dos nutrientes essenciais para preparação do meio de cultura, dos tampões e equipamentos que podem não garantir as condições de pH e anaerobiose (VAN SOEST, 1994).

Se referindo a cinética de trânsito das partículas pelo TGI de ruminantes a técnica da fibra marcada se demonstram eficiente em estimar os parâmetros de passagem da partícula. Contudo, os marcadores externos devem ser usados com cautela devido a variações em técnicas de marcação que proporcionam mudanças na densidade e na degradabilidade das partículas marcadas assim como também é possível ocorrência de migração do marcador, da fibra originalmente marcada, para outras partículas do alimento

(UDÉN et al, 1980;. EHLE, 1984; BEAUCHEMIN e BUCHANAN-SMITH, 1989; COMBS et al., 1992).

As estimativas de digestibilidade e cinética de trânsito obtidas a partir das técnicas de incubação *in vitro* e por fibra marcada, ajustados em modelos de predição, podem gerar dados confiáveis e úteis à nutrição de ruminantes, tais como: quantidade de massa de fibra no rúmen e quantidade de fibra digerida no TGI de ruminantes.

Os modelos de dinâmica da digestão não só permitem a previsão do valor nutritivo para forragens como também prevêm mudanças de características intrínsecas na dieta, também permitem uma melhor compreensão dos fatores que podem limitar os processos digestivos. As críticas em relação às predições de modelos, muitas das vezes, são mais possíveis de ocorrerem em virtude de estimativas errôneas de parâmetros da digestão e cinética de passagem em vez de problemas na concepção da estrutura do modelo (ILLIUS e GORDON, 1991).

A modelagem é, sobretudo, uma tentativa de integração de diferentes fenômenos que são limitados pelos recursos humanos e materiais disponíveis. Portanto, é necessário avaliar o poder preditivo dos diferentes modelos existentes para que possam ser usados, com menor chance de cometer erros, nas estimativas referentes à nutrição e recomendações zootécnicas.

2. OBJETIVO

Aferir modelos de predição da quantidade ruminal de fibra (Q_{FDN}) e da quantidade diária de fibra digerida (D_{FDN}) com base em parâmetros da cinética de degradação e passagem de partículas fibrosas em bovinos por meio da comparação entre valores observados e preditos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Fibra na nutrição de ruminantes

Devido à facilidade de acesso e adequação nos mais variados ambientes, as forrageiras são o principal componente de dietas voltadas para os ruminantes, fazendo uso dos alimentos concentrados apenas para suplementar as contribuições nutricionais das forragens. As forragens são importantes fontes de nutrientes, além de fornecer proteína e energia, proporcionam fibras essenciais à ruminação e manutenção da saúde do ambiente ruminal. Na formulação de dietas para os ruminantes, a qualidade e a quantidade de forragem são fatores a serem considerados para o atendimento das exigências nutricionais incluindo a necessidade de fibra desses animais (MERTENS, 1997). Desta forma, as fibras estruturais das plantas têm sido melhor estudadas para o entendimento do seu comportamento na câmara de fermentação dos animais herbívoros.

Ao longo do desenvolvimento vegetativo das plantas, elas passam por alterações estruturais que modificam a concentração dos seus componentes assim como também alteram seu valor nutricional. A disponibilidade dos carboidratos das forrageiras como nutriente para o animal depende dos açúcares que os compõem, das ligações estabelecidas entre eles e de outros fatores de caráter físico-químico (VAN SOEST, 1994).

No conteúdo celular vegetal encontramos os carboidratos não estruturais (CNE) como glicose e frutose, e carboidratos de reserva como o amido. Na parede da célula vegetal destacamos os carboidratos estruturais (CE), representados principalmente pela pectina, hemicelulose e celulose. São estes os elementos mais importantes na determinação da qualidade dos alimentos volumosos a serem inseridos em dietas de ruminantes (VAN SOEST, 1994). Os CE têm função estrutural para os vegetais fornecendo o suporte físico necessário para crescimento e resistência das plantas. Os CNE compõem o conteúdo celular e exercem funções fisiológicas e de reserva de energia para reprodução, crescimento e sobrevivência durante períodos de estresse (VAN SOEST, 1994). A separação dos carboidratos em CE e CNE referem-se unicamente a função destes desempenhadas nas plantas, não devendo ser confundido com sua finalidade na nutrição de ruminantes (MERTENS, 1987).

Devido a essa função estrutural, dos carboidratos que compõem a parede celular, é comum a confusão entre os termos parede celular e carboidratos fibrosos. O conceito fibra, aplicado à nutrição animal, tem como definição: fração do alimento, indigestível ou de lenta digestão, que ocupa espaço no trato gastrintestinal (MERTENS, 1997). Sendo assim não podemos confundir os termos parede celular com fibra alimentar, pois, a pectina compõe a parede celular e no trato gastrintestinal dos animais é rapidamente absorvida não se comportando como fibra.

A primeira terminologia empregada nas análises quantitativas de fibra, foi estabelecida por volta de 1860 e englobava todo material fibroso do alimento como um único componente dietético, definido então como fibra bruta (FB), porém esse termo ainda permitia subdivisões, pois frações distintas da FB se comportavam com diferentes eficiências de digestão. Este fato que prejudicava o entendimento a cerca da disponibilidade de energia metabolizável para os animais. Então, em 1968, com a contribuição de Van Soest e Wine, o termo e a própria entidade FB caiu em desuso. Os autores propuseram o método detergente no qual se dividiu a FB em dois componentes: a fibra insolúvel em detergente ácido (FDA), que foi desenvolvida inicialmente apenas como um tratamento prévio

na determinação da lignina com ácido sulfúrico à 72% e a fibra insolúvel em detergente neutro (FDN), fração da fibra do alimento que melhor representa a causa de repleção ou enchimento no TGI. A metodologia proposta pode explicar de maneira mais acurada a disponibilidade de energia nos processos de digestão em ruminantes.

A fração FDA dos alimentos é composta pelos componentes celulose e lignina como principais constituintes, além de cinza e alguns compostos nitrogenados (VAN SOEST, 1994). A fração FDN inclui celulose, hemicelulose e lignina. A primeira proposta de metodologia para definir o FDN, descrito por Van Soest e Wine (1968), contemplava a utilização de sulfito de sódio para remover bases nitrogenadas contidas nos carboidratos estruturais que compunham o FDN (MERTENS, 2002). Devido ao excesso de amido, nas amostras de determinados alimentos, o método original era ineficaz em retirar esse polissacarídeo, então Van Soest et al. (1991) ajustaram a metodologia com a inclusão de amilase estável a quente no procedimento e retirou do procedimento o sulfito de sódio pois temia sua influência na perda de composto fenólicos e lignina, a técnica ficou conhecido como método do resíduo de detergente neutro (RDN). Porém, a técnica ainda apresentava limitações (MERTENS, 2002).

A técnica ainda passou por outras alterações, acrescentando novamente o sulfito de sódio e o uso da amilase com objetivo de eliminar possíveis contaminantes como proteínas aderidas à parede celular e o amido excedente, respectivamente, o que permitiu quantificar com precisão e acurácia a fibra do alimento (MERTENS, 2002). Dessa forma, cabe salientar que a ocorrência de divergência entre resultados dos teores de FDN entre laboratório muitas das vezes está associada à escolha da técnica que foi usada (MERTENS, 2002). Atualmente o método de referência para quantificar a fibra é feito por meio de tratamento em solução detergente neutro com sulfito de sódio e adição de amilase termoestável padronizada, no que se refere a sua quantidade mínima com atividade enzimática suficiente durante o processo de digestão, sendo o resíduo final queimado para correção das cinzas insolúveis, obtendo o produto final denominado aFDN_{mo} ou matéria orgânica fibrosa (MERTENS, 2002; UDÉN et al., 2005).

Com relação à fração indigestível da fibra não tem como deixar de falar da lignina, polímero fenólico altamente ramificado com estrutura complexa. Para a planta ela exerce função estrutural sendo muito importante no desenvolvimento fisiológico da mesma, à medida que a planta se desenvolve ocorre maior acúmulo de lignina fato que viabiliza o crescimento da mesma. No entanto, a estrutura da lignina se associa com alguns carboidratos estruturais (celulose e hemicelulose) e também se complexa com determinadas proteínas da parede celular, tornando esses nutrientes indisponíveis aos processos de digestão, fato que implica diretamente com a digestibilidade da fibra para a nutrição de ruminantes (VAN SOEST e WINE, 1968). As características das plantas tais como composição, estrutura e concentrações variam de acordo com a origem botânica, tecido que compõem a estrutura, idade e também fatores ambientais as quais a planta foi submetida.

3.2. Estimativas da degradação da fibra no rúmen

Os carboidratos são compostos orgânicos que compõem a maior parte dos sistemas biológicos, além disso, são fundamentais para nutrição dos primeiros níveis tróficos da teia alimentar (NELSON e COX, 2008). A parede celular vegetal representa a principal fonte de energia para os herbívoros, e entre eles o que melhor faz uso da energia química contida nessas estruturas são os ruminantes, que por sua vez, tem a capacidade de aproveitar alimentos fibrosos de baixa qualidade e transformá-los em produtos úteis à satisfação das necessidades nutricionais humanas (HOFMANN, 1988; e VAN SOEST, 1994). A retenção dos alimentos no rúmen-retículo permite uma relação simbiótica entre o animal e os microrganismos ruminais capazes de utilizar os alimentos ingeridos como substratos para o seu crescimento e, como consequência, disponibilizar nutrientes para o hospedeiro (HUNGATE, 1988).

A capacidade da dieta em suprir os nutrientes exigidos pelos ruminantes e proporcionar um desempenho ideal é diretamente influenciada pelo consumo de alimentos, e pela degradabilidade do mesmo. Sabendo da interação simbiótica

dos microrganismos com os ruminantes muito tem se feito para desenvolver novas técnicas para estabelecer as quantidades e os teores de nutrientes necessários para melhor resposta dos microrganismos e, conseqüentemente, dos animais (NOCEK, 1998; VIEIRA, 1995).

Dentre os componentes que caracterizam o valor nutritivo de um alimento (consumo, digestibilidade e eficiência energética), a digestibilidade é a medida mais precisa quando comparado às demais. Isto está relacionado ao fato de a digestibilidade oferecer menor variação entre animais ao estabelecer o valor alimentar, além do quê, o consumo em ensaios de pastejo é obtido por meio de estimativas indiretas que não são tão confiáveis (VAN SOEST, 1994). O processo de digestão da fibra consiste na hidrólise dos polissacarídeos e a conversão dos monossacarídeos resultantes em ácidos graxos voláteis, gases da fermentação e em calor (VARGA et al., 1998). Dessa forma, digestibilidade da fibra pode ser definida como a proporção da fibra ingerida que não é excretada nas fezes.

As técnicas de análise para estimar a degradabilidade da matéria orgânica dos alimentos, utilizados na alimentação de ruminantes, consistem na quantificação do desaparecimento do substrato durante a incubação (TILLEY e TERRY, 1963; GOERING e VAN SOEST, 1970). Com exceção do caso da produção cumulativa de gases, onde a digestão é estimada de forma indireta pela quantificação da produção de gases.

Os sistemas de digestão química são rápidos e oferecem resultados reprodutíveis, no entanto, não refletem o processo biológico digestivo que ocorrem no ambiente ruminal. Dentre as técnicas de degradabilidade do alimento, na nutrição de ruminantes, destacamos a os ensaios de digestão *in vitro* com inócuo de conteúdo de ruminal. A realização de ensaios biológicos para quantificação da degradação do alimento tem como vantagens a rapidez, a uniformidade físico-química do microambiente de fermentação (VAN SOEST, 1994).

3.2.1. Técnicas de degradação *in vitro*

Os ensaios de digestão *in vitro* possibilitam estimativas confiáveis sobre a degradação dos alimentos no rúmen. Já existem várias técnicas propostas com o objetivo de estimar a digestibilidade dos alimentos utilizados na nutrição de ruminantes, dentre elas os métodos gravimétricos que utilizam um único tempo de incubação, como a digestibilidade *in vitro* proposta por Tilley e Terry (1963). As técnicas *in vitro* são uma importante ferramenta na nutrição de ruminantes e se aplicadas de maneira correta tem muito a contribuir no entendimento na cinética de digestão.

A eficiência da técnica de degradação *in vitro*, dos complexos polímeros encontrados nos vegetais, apenas pode ocorrer de maneira correta caso os microrganismos ruminais sejam cultivados da mesma forma como são encontrados no ambiente ruminal, pois, as exigências nutricionais de alguns microrganismos são atendidas pelos produtos finais de outros e em casos específicos pela função metanogênica e reoxidação dos equivalentes redutores (RUSSELL e STROBEL, 1993). A diversidade no metabolismo das espécies microbianas do rúmen pode ser diferenciada quanto à utilização de carboidratos estruturais e não-estruturais (RUSSELL et al., 1992), assim como também pela ação fermentadora de ácidos orgânicos, proteolítica e metanogênica (BROCK et al., 1994; VAN SOEST, 1994).

O método de análise de fermentação *in vitro* (TILLEY e TERRY, 1963; GOERING e VAN SOEST, 1970) é amplamente utilizado e apresenta como limitações: 1) a análise da fibra destrói a amostra e são necessárias diferentes amostras para cada ponto de avaliação, de forma que estes estudos de cinética são trabalhosos, cansativos e com poucas repetições em cada tempo de incubação; 2) estágios iniciais da digestão são de difícil estudo devido à perda de massa correspondente ser baixa; 3) a taxa de degradação dos componentes solúveis da forragem pode não ser determinada. Tais desvantagens não inviabilizam a utilização do método, apenas devem ser conhecidas para execução da técnica de maneira que não prejudique os resultados.

3.3. Dinâmica de *pool* único do conteúdo fibroso no rúmen

A digestão do alimento fibroso por ruminantes é dependente da permanência do alimento no órgão de fermentação rumén-retículo (RR), dessa forma, são afetados pela passagem e consumo de alimento pelo animal. O consumo de matéria seca (CMS), de forma geral, é o fato mais relevante que afeta o desempenho animal, pois ele que coordena a entrada, em quantidade suficiente ou não, de nutrientes para atender a demanda produtiva dos animais (MERTENS, 1987; VAN SOEST, 1994), outro fator que deve ser levado em conta é a influência que o CSM exerce sobre a taxa de degradação e de passagem (Figura 1).

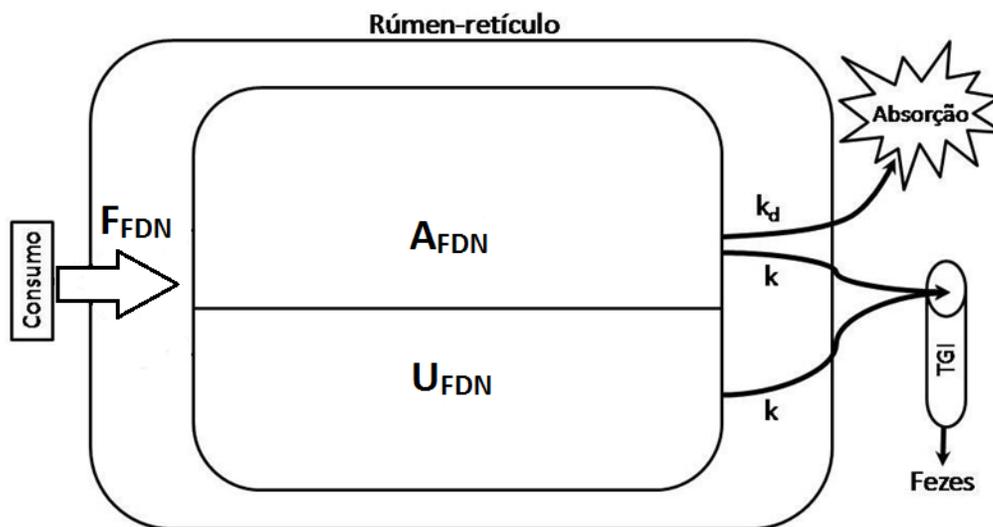


Figura 1: Compartimentalização da massa ruminal de fibra no rúmen e as forças que atuam sobre a saída das partículas do referido compartimento (Adaptado de Allen e Mertens, 1988).

O esquema da Fig. 1 representa o modelo de *pool* único da fibra, onde A_{FDN} e U_{FDN} correspondem respectivamente às frações digestíveis e indigestível da fibra insolúvel em detergente neutro, obtida a partir do consumo representado pelo F_{FDN} . A absorção é obtida a partir da competição entre a digestão da fração potencialmente degradável (A_{FDN}) e seu escape do compartimento RR. A fração U_{FDN} permanece inalterada e seu desaparecimento se dá unicamente pelo

escape. As variáveis k_d e k denotam as taxas específicas de degradação e escape e são expressas em unidades recíproca do tempo.

O marco de conhecimento que proporciona embasamento teórico para o entendimento do modelo proposto na Figura 1 é o mesmo que rege a *Lei de Ação das Massas*, caracterizado como processo cinético de primeira ordem, onde a reação é limitada apenas pela disponibilidade de substrato.

3.4. Dinâmica de *pool* heterogêneo do conteúdo fibroso no rúmen

Alguns autores questionaram a capacidade de predição dos modelos simples de primeira ordem e propuseram alternativas para a descrição matemática dos perfis de degradação, tomando como base os fenômenos de retardo em dois compartimentos (ELLIS et al., 1994; DHANOA et al., 1985). Os referidos modelos compartimentados têm a não linearidade como proposta na interpretação dos perfis de degradação, assim, possibilitam melhor interpretação de fenômenos biológicos inerentes ao processo de digestão e de cinética de trânsito de carboidratos fibrosos no rúmen (VIEIRA et al., 2008ab; VIEIRA e FERNANDES, 2006).

Em posse de conhecimentos referente ao perfil de excreção dos marcadores de fibra quimicamente marcada, Blaxter et al. (1956) foram os primeiros a sugerirem que tais perfis poderiam ser descritos como a soma de dois componentes exponenciais com tempo de retardo ou de trânsito ao longo do TGI. Mesmo com o trabalho de Balch e Johnson em 1950, onde associavam que 80% do tempo médio de retenção das partículas era atribuído ao RR, Blaxter e seu grupo associaram esse atraso a dois compartimentos físicos (anatômicos) distintos, sendo o primeiro o rúmen e o segundo o abomaso.

Para Hungate (1966), o fluxo das partículas pelo TGI também depende da natureza dos alimentos, não apenas dos fenômenos de retenção, pois a retenção pode ocorrer em qualquer seguimento anatômico do TGI, desde que haja retardo e misturas entre partículas recém-ingeridas com partículas já existentes (conturbação do fluxo das partículas). Contudo, o autor achou suficiente a

concepção de existência de dois compartimentos no rúmen, dividindo os compartimentos com base em conhecimentos empíricos onde o primeiro contempla partículas maiores que ainda serão ruminadas, pois ainda não tem o tamanho suficiente para passar através do orifício retículo-omasal e um segundo compartimento constituído por pequenas partículas dispersas na fase líquida, aptas para o escape do rúmen.

O emaranhado de partículas recém-ingeridas, juntamente com partículas já existentes, com tamanho grosseiro e baixa densidade, formam o sobrenadante aqui denominado *raft*. À medida que as partículas de alimento potencialmente digerível (A_{FDN}) sofrem ações enzimáticas da digestão e mecânicas de mastigação vão reduzindo de tamanho e migrando para o segundo compartimento. O segundo compartimento, conhecido como *pool* de partículas escapáveis, se forma junto à fase líquida na porção ventral do RR. Com relação às partículas indigestíveis (U_{FDN}) à medida que reduzem de tamanho, por processos mecânicos, seguem o mesmo caminho migrando do *raft* para o *pool* de partículas escapáveis. As resultantes desses processos de transferência foram agregadas em uma taxa de transferência simples (λ), e assume-se que este processo apresenta uma distribuição gama tempo dependente. Os processos que envolvem a cinética de digestão são (Fig. 2) descritos pela taxa de digestão (k_d) exponencialmente distribuída pelo tempo (VIEIRA et al., 2008b). No segundo compartimento a fração A_{FDN} passa a ter duas possibilidades o escape imediato ou seguem sendo digeridas até que ocorra o escape. Em relação às partículas U_{FDN} , no segundo compartimento, se mantem inalteradas aguardando o momento de escape. A essa taxa de escape final de ambas as partículas do segundo compartimento é representada por k (VIEIRA et al., 2008b).

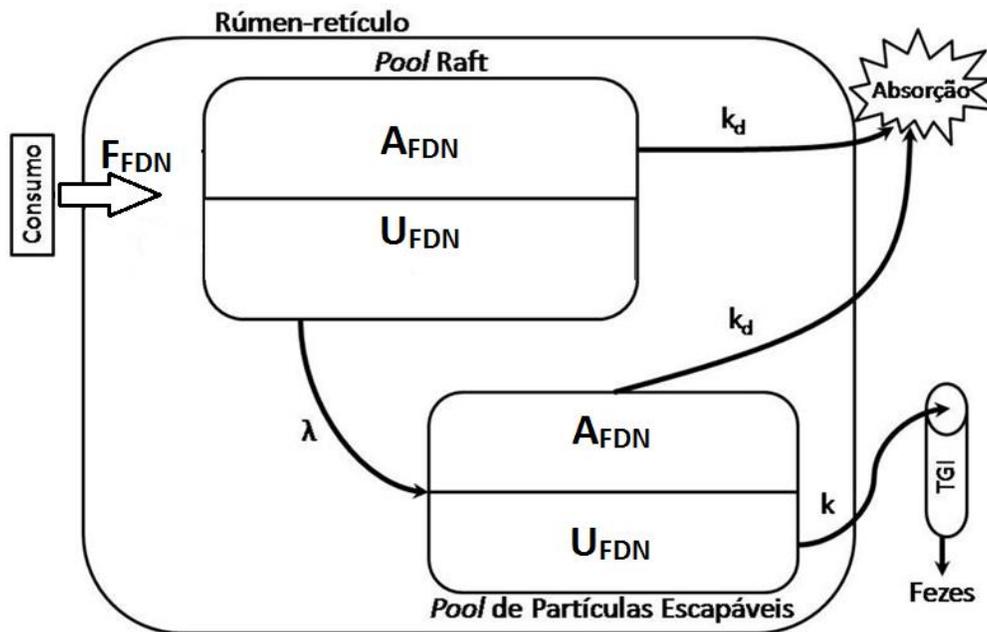


Figura 2: Representação esquemática dos processos que envolvem o *pool* heterogêneo no rúmen-retículo (Adaptado de Vieira et al., 2008b).

Para Mertens (1973, 1977), o início da degradação das partículas fibrosas sofre um atraso inicial (fenômeno *lag*) associado ao tempo de colonização das partículas. A digestão da fibra no rúmen ocorre pela ação das enzimas bacterianas, e para tal, é necessário à formação do biofilme de bactéria ao redor da partícula fibrosa. Sua formação é principalmente dependente de restrições físicas tais como a superfície de contato disponível e acessibilidade de micróbios ao interior das células (RUSSELL, 2002; WILSON, 1993). Outros obstáculos ao fenômeno de colonização da partícula fibrosa no rúmen são a necessidade de solubilização de possíveis substâncias (naturais) inibidora de bactérias e a dependência da hidratação das partículas para possibilitar a ação das enzimas. As bactérias necessitam sintetizar enzimas complexas extracelulares para a degradação dos carboidratos estruturais dos vegetais (ELLIS et al., 2005; MERTENS, 1977, 2005). Uma vez estabelecido o início da degradação, ou seja, superado o *lag time*, a digestão do material fibroso pode ser explicada por uma exponencial de primeira ordem.

O processo de transferência de massa entre compartimentos no rúmen pode ser descrito por meio de um sistema com base na cinética de trânsito onde são acomodados às etapas iniciais de preparação (λ_a) das partículas recém-ingeridas (\tilde{A}_{FDN} e U_{FDN}) para degradação, a retenção seletiva (λ_r) da passagem da fibra do *raft* para o compartimento de partículas elegíveis ao escape e o escape final (k) das partículas aptas a passar pelo orifício retículo-omasal (Figura. 3).

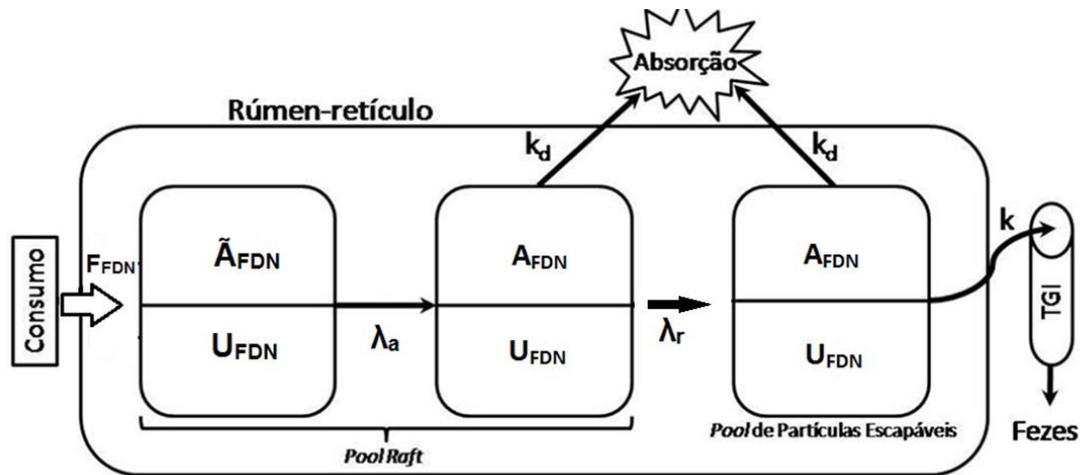


Figura 3: Modelo da dinâmica ruminal das frações alimentares incluindo o “gap” de preparo e colonização do substrato (Adaptado de Allen e Mertens, 1988).

Com o esquema exposto na Figura 3 é possível idealizar a competição entre os processos químicos (enzimas microbianas) e físicos (mastigação, ruminação e motilidade) decorrente da digestão no rúmen. Esses processos atuam disponibilizando o substrato para a digestão, reduzindo o tamanho das partículas e liberando os nutrientes para a flora bactéria ou para o hospedeiro. Dessa forma, essas forças envolvidas no processo atuam para digerir, misturar e propelar a digesta pelo restante do TGI. No entanto, existem ações que proporcionam resistência, tais como a menor densidade das partículas recém-ingeridas e o aumento de sua capacidade de flutuação pela produção de gases retidos no interior dos fragmentos, fatos estes, que agregam tempo de retardo a passagem das partículas (HUNGATE, 1966; WATTIAUX et al., 1991, 1992b).

A interpretação cinética alternativa proposta na Figura 3 parece produzir previsões mais verossímeis sobre a dinâmica da fibra no rúmen e de outras variáveis de interesse tais como o consumo voluntário, o crescimento microbiano no rúmen, a absorção e utilização de nutrientes e a previsão do desempenho dos animais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Origem dos Dados e das Amostras

4.1.1. Dados e Amostras para Avaliação do Modelo de Digestibilidade e para as Estimativas da Cinética de Trânsito

Os dados de digestibilidade observada da matéria orgânica fibrosa (D_{FDN}) foram obtidos do experimento de Virgínio Júnior (2014). O referido trabalho foi conduzido em dois Quadrados Latinos simultâneos e balanceado para quatro tratamentos (LUCAS, 1957). Foram utilizados quatro níveis de oferta diária de fibra insolúvel em detergente neutro escalonada para a massa corporal dos animais: 3, 6, 9 e 12 g/(kg.dia). As dietas foram calculadas de modo a atingir os níveis de oferta de matéria orgânica fibrosa ($aFDNom^1$), utilizando silagem de milho, farelo de soja e fubá de milho. A formulação de dietas com planos nutricionais crescentes do nível de oferta de fibra foi tratada como um problema de programação não linear, conforme o procedimento descrito por Jardim et al. (2013; 2015). O algoritmo do modelo foi programado usando o programa Solver[®] do Microsoft Excel[®] com o método de resolução de Newton (LASDON et al., 1978).

¹ aFDNom: Metodologia da extração da fibra em detergente neutro com adição de sulfito, solução padronizada de α -amilase termoestável (termamyl 2X) e incineração do resíduo para correção das cinzas.

Os períodos experimentais duraram 21 dias, assim distribuídos: período de adaptação de 14 dias e período de coleta de 7 dias. Os animais foram alimentados duas vezes ao dia e as sobras coletadas antes da oferta matinal de alimento. O oferecido, as sobras e as fezes foram coletados diariamente durante o período de coleta (VIRGÍNIO JÚNIOR, 2014).

Os perfis de cinética de trânsito de partículas fibrosas dos alimentos empregados no estudo de digestibilidade descrito por Virgínio Júnior (2014) foram extraídos de um conjunto de dados obtidos por Abreu (2016), que realizou ensaios para determinação da cinética de trânsito da fibra de silagem de milho e de concentrados. Resumidamente, os alimentos (silagem de milho e concentrados) foram lavados em solução detergente neutra para extração do excesso de conteúdo celular (UDÉN et al., 1980; ELLIS e BEEVER, 1984). Diferentes porções dessa fibra foram complexadas com metais trivalentes comumente empregados em ensaios de digestão como indicadores de fase sólida. Os metais utilizados foram o Cromo (Cr), Itérbio (Yb) e Európio (Eu) para a silagem de milho e o Ítrio (Y) para a fibra do farelo de soja e do milho moído. As amostras de fezes foram coletadas diretamente da ampola retal de novilhos nas interações novilhoxperíodo nos dois quadrados latinos nos seguintes tempos pretendidos: 0; 4; 8; 12; 16; 20; 24; 28; 32; 36; 40; 44; 48; 56; 64; 72; 80; 88; 96; 108; 120; 132; 144 e 192 horas após a ingestão do marcador. Entretanto, esses tempos foram corrigidos para os tempos de coleta efetivamente realizados para evitar o viés sobre as estimativas dos parâmetros da excreção fecal do indicador (MATIS et al. 1989). Dessa forma, todos os componentes da dieta foram rastreados quanto ao seu trânsito pelo trato gastrintestinal dos novilhos.

4.1.2. Dados e Amostras para Avaliação do Modelo de Predição da Massa Ruminal de Fibra (Q_{FDN})

Valores de Q_{FDN} foram obtidos do trabalho de Tamy (2015). Naquele experimento, quando foram utilizados 32 bovinos machos, mestiços, oriundos de cruzamentos das raças Gir Leiteiro e Holandês e mantidos em regime de

confinamento recebendo dieta contendo silagem de milho acrescida de farelo de soja para corrigir a proteína da ração. As dietas foram formuladas com a utilização das equações propostas pelo AFRC (1993), para proporcionar ganho de 0,600 kg/dia.

Os animais foram periodicamente abatidos em intervalos de massa corporal de 50 kg, os primeiros com 100 kg e os últimos com 450 kg de massa corporal. O abate era realizado com um intervalo de aproximadamente 3 horas após a oferta de alimento matinal, com intuito de garantir o máximo preenchimento do rúmen no momento da quantificação do conteúdo do órgão. Após a etapa de evisceração, as extremidades do rúmen eram amarradas para evitar perda de conteúdo e o órgão era separado e encaminhado para o laboratório onde era pesado cheio e vazio possibilitando extrapolar a massa de conteúdo do órgão e amostragem do conteúdo para posteriores análises visando a quantificação da matéria orgânica fibrosa (aFDN_{mo} segundo Mertens, 2002) presente no rúmen ou massa ruminal de fibra (Q_{FDN}, g).

4.2. Degradação *in vitro* dos carboidratos fibrosos

As análises de composição bromatológica dos alimentos foram realizadas pelos autores nos respectivos trabalhos aqui apresentados para caracterização dos alimentos utilizados nos ensaios de digestão (Tabela 1).

As amostras dos alimentos oferecidos nos experimentos de Virgínio Júnior (2014) e Tamy (2015) foram incubadas pela técnica *in vitro* com intuito de obter perfis de degradação da aFDN_{mo} (MERTENS, 2002), obtida pela extração dos resíduos de incubação *in vitro*. A interpretação cinética desses perfis possibilitou estimar os parâmetros da degradação conforme descrito na seção 4.3. No total foram obtidos nove perfis de degradação para as silagens de milho, um perfil de degradação para o milho moído e um perfil de degradação para o farelo de soja. Cabe ressaltar que cada batelada de incubação em banho-maria continha todos os alimentos e todos os tempos de incubação distribuídos em frascos de vidro;

esta batelada correspondeu a uma corrida que, repetida no tempo (UDÉN et al., 2012), possibilitou a obtenção de duplicatas válidas.

Tabela 1. Composição bromatológica dos componentes das diferentes dietas empregadas nos experimentos avaliados

| Alimento | Entidades nutricionais | | | | |
|-----------------------|------------------------|---------------------|-----------------|---------------------|------------------|
| | MS ¹ | Cinzas ² | PB ² | aFDNmo ² | LDA ² |
| FM [†] | 903,7 | 14,1 | 93,0 | 106,5 | 5,4 |
| FS [†] | 905,2 | 66,3 | 500,0 | 139,7 | 11,6 |
| SM1 [†] | 352,5 | 55,5 | 84,7 | 529,4 | 35,7 |
| SM2 [†] | 329,6 | 55,2 | 83,9 | 571,2 | 47,2 |
| SM3 [†] | 297,2 | 54,0 | 92,6 | 553,5 | 37,5 |
| SM4 [†] | 284,6 | 53,4 | 87,9 | 606,0 | 44,9 |
| SM-G1:G2 [#] | 355,9 | 67,9 | 76,7 | 530,7 | 37,8 |
| SM-G3 [#] | 340,3 | 80,5 | 78,4 | 528,7 | 33,7 |
| SM-G4 [#] | 277,3 | 67,2 | 81,6 | 475,9 | 28,9 |
| SM-G5 [#] | 341,4 | 63,2 | 81,5 | 583,8 | 35,7 |
| SM-G6 [#] | 278,6 | 56,9 | 86,3 | 481,9 | 30,1 |

¹ g.kg⁻¹ de matéria natural. ² g.kg⁻¹ de matéria seca. [†] Estudo de digestibilidade *in vivo* (VIRGÍNIO JUNIOR, 2014): Fubá de milho (FM); Farelo de soja (FS); silagens de milho ofertadas nos quatro períodos experimentais (SM1, SM2, SM3 e SM4). [#] Estudo da quantidade de fibra ruminal (TAMY, 2015): silagens de milho utilizadas nos diferentes períodos de avaliação de consumo de cada grupo de animais abatidos (SM-G, G2, SM-G3, SM-G4, SM-G5 e SM-G6). Matéria seca (MS); Proteína bruta (PB); Matéria orgânica fibrosa (aFDNmo); Lignina em detergente ácido (LDA).

4.2.1. Preparação do meio de cultura para incubação

As incubações *in vitro* foram feitas em banho-maria a 39 °C em frascos de vidro âmbar de 100 mL. Os frascos foram vedados com tampas de borracha e lacres de alumínio. Utilizamos aproximadamente 0,5 g de amostras pré-secas em estufa ventilada a 55 °C por 72 horas, moídas em moinho tipo Wiley com peneira

de 1 mm. As amostras foram incubadas com 40 mL de meio de cultura reduzido e 10 mL de inóculo ruminal como descrito por Goering e Van Soest (1970). O conteúdo ruminal (partículas e fase líquida) que deu origem ao inóculo foi obtido de três ovinos machos adultos com fistula ruminal² e composto. O inóculo, o meio de cultura e a solução redutora foram preparados de acordo com as recomendações de Hall e Mertens (2008). Os ovinos doadores foram arraçoados com uma dieta contendo 1.2 vezes a energia metabolizável de manutenção segundo o AFRC (1993). A dieta foi à base de silagem de milho e farelo de soja, os quais eram oferecidos de forma simultânea uma vez ao dia. O líquido e o material fibroso do conteúdo ruminal foram coletados separadamente, duas horas após a alimentação, e armazenados em duas garrafas térmicas até o momento de utilização no laboratório. O material fibroso era então batido em liquidificador por 60 segundos junto com o líquido ruminal na proporção de 1:2 (material fibroso: líquido ruminal) e com infusão contínua de CO₂. A mistura era filtrada através de oito camadas gaze. Em seguida, o inóculo ruminal filtrado era adicionado ao meio de cultura previamente reduzido na proporção 4:1, mantida a mistura a 39°C sob infusão constante de CO₂ até que o volume necessário de líquido de incubação fosse transferido para os frascos. Em seguida, os frascos eram vedados e transferidos à incubadora (HALL e MERTENS, 2008).

4.2.2. Degradabilidade dos carboidratos fibrosos por gravimetria

Os tempos de incubação empregados para as amostras de silagem de milho foram 0, 3, 6, 9, 12, 24, 36, 72 e 96 horas e para os alimentos concentrados, 0, 2, 4, 8, 12, 20, 32, 48 e 64 horas. Foi incluído para cada tempo de incubação um branco (40 mL meio de cultura reduzido e 10 mL de inóculo). Em cada tempo preestabelecido, os frascos (1 Branco + 1 Amostra de cada alimento) eram retirados do banho-maria, levados para um banho de gelo para redução da temperatura e conseqüente redução da atividade microbiana, e assim que

² Observadas as recomendações para uso de animais com cânulas permanentes descritas no protocolo 207 da comissão institucional de ética para o uso de animais em experimentos.

possível os frascos eram centrifugados a 1500 g por 15 minutos a 4°C em centrífuga Hanil modelo Supra 22K (*Hanil Science Industrial Co., Ltd, Gyeyang-gu, Incheon*, Coréia do Sul). Após a centrifugação, o material foi filtrado em papel de filtro quantitativo de filtragem rápida evitando-se a transferência de partículas. As partículas do resíduo da incubação contidos no *pellet* e as eventuais partículas retidas no papel de filtro foram transferidas quantitativamente para copos *Berzelius* com auxílio de, aproximadamente, 50 mL de detergente neutro. O resíduo de cada tempo de incubação foi submetido à extração com detergente neutro para quantificação da massa de aFDN_{mo} com adição de $0,5 \pm 0,1$ g de Na₂SO₃ (sulfito de sódio) de acordo com o método 2002.04 (MERTENS, 2002) e conforme a recomendação de Hall e Mertens (2008).

4.3. Interpretação cinética dos perfis de degradação gravimétrica da fibra

A interpretação cinética dos perfis da fibra foram efetuadas empregando-se o modelo logístico decrescente (VIEIRA et al., 2012; VIEIRA et al., 2008a):

$$R_t = \tilde{A}_{FDN} \times \left(\delta_a^{N_a} \exp(-k_d t) + \exp(-\lambda_a t) \sum_{i=1}^{N_a-1} \frac{(1 - \delta_a^{N_a-i})(\lambda_a t)^i}{i!} \right) + U_{FDN}$$

Eq. 1

Em que R(t) é o resíduo de incubação em um determinado tempo t (h); \tilde{A}_{FDN} representa a fração insolúvel potencialmente degradável, não disponível para digestão no tempo zero; N é um número inteiro positivo que representa a ordem de dependência do tempo para o preparo do substrato para a digestão, λ_a (1/h) é a assíntota da taxa de preparação da fração \tilde{A}_{FDN} digerível e com sua respectiva taxa fracionária de digestão, k_d (1/h); a constante $\delta_a = \lambda_a / (\lambda_a - k_d)$ simplifica o modelo e U_{NDF} representa a fração indigerível da aFDN_{mo}. Neste modelo, quando $\lambda_a \rightarrow \infty$, o modelo reduz-se ao caso exponencial simples (VIEIRA et al., 2008a).

4.4. Interpretação cinética dos perfis de excreção dos indicadores complexados à fibra

O modelo descrito na Eq. (2) foi utilizado para interpretar os perfis de excreção de marcadores de fibra, sendo geralmente referidos como uma classe de modelos GN, em que, a sigla GN representa a distribuição gama sendo N a ordem de dependência do tempo (ELLIS et al., 2002; MATIS et al., 1989; POND et al., 1988).

$$\dot{p}_o(t) = (\lambda t)^{N-1} \lambda \exp(-\lambda t) / (N - 1)! \quad \text{Eq. 2}$$

Em que λ (1/h) é o valor assintótico tempo-dependente da taxa fracionária de passagem, $\forall N \in \mathbb{Z}^+ \wedge N \geq 2$. A função $\dot{p}_o(t)$ corresponde à função densidade de probabilidade de que uma dada partícula estará no exterior do TGI num dado momento t . Para imitar os perfis temporais, sempre que $t < \tau$, $\dot{p}_o(t) = 0$; caso contrário a Eq. (2) opera.

Matis e Hartley (1971) e Matis (1972) estenderam esta derivação anterior para um sistema de dois compartimentos, nos quais os tempos de retenção das partículas no primeiro compartimento tem distribuição gama e os tempos de vida das partículas no segundo compartimento são exponencialmente distribuídos. De fato, as partículas no segundo compartimento são um caso especial da distribuição gama ($\Gamma(N, \lambda, t)$): a distribuição exponencial ou $E(k, t) = \Gamma(N, \lambda, t)$, para $N = 1$.

No sistema com dois compartimentos (*raft* e *pool* de partículas escapáveis), conforme a expressão:

$$p_2(t) = \delta^N \exp(-kt) - \exp(-\lambda t) \sum_{i=0}^{N-1} \delta^i (\lambda t)^{N-i} / (N - i)! \quad \text{Eq. 3}$$

Na Eq. (3), $\delta = \lambda / (\lambda - k)$, k é a taxa fracionária de escape da partícula marcada pertencente ao conjunto de partículas dispersas na fase líquida (*pool* de renovação) localizado abaixo do *raft* e ambos dentro do compartimento rúmino-retiicular. O parâmetro λ tem o mesmo significado anteriormente atribuído e está

associado à transferência da partícula marcada do primeiro compartimento ou *raft* para o pool de renovação (VIEIRA et al., 2008b).

Matis et al. (1989) define final do processo de transferência das partículas para o modelo que descreve este sistema de duplo compartimento da seguinte forma:

$$\dot{p}_o(t) = kp_2(t) \quad \text{Eq. 4}$$

O modelo resultante é chamado de classe GNG1 por causa da distribuição gama com o parâmetro N associado ao *raft* e a distribuição exponencial associada ao *pool* de renovação (ELLIS et al., 1994; MATIS et al., 1989; POND et al., 1988; WYLIE et al., 2000).

A fim de obter estimativas válidas para os parâmetros de trânsito de partículas com elementos estocásticos, pode-se ajustar o seguinte modelo segmentado depois de substituir o $\dot{p}_o(t^*)$ pela Eq.(2) ou Eq. (4) de acordo com MATIS et al. (1989):

$$C_t = \begin{cases} \gamma + e_t & , t < \tau (t^* < 0); \\ \gamma + C_0\dot{p}_o(t^*) + e_t & , t \geq \tau (t^* \geq 0). \end{cases} \quad \text{Eq. 5}$$

Na Eq. (5), C_t e o e_t têm os mesmos significados que os descritos para a equação proposta por Dhanoa et al. (1985); em que $t^* = t - \tau$ e C_0 e τ , após a derivação sugerida por Vieira et al. (2008b), são a concentração do marcador no primeiro compartimento no tempo zero e o tempo de trânsito (h) para uma dada partícula marcada que passou através do orifício retículo-omasal ser recuperada na matéria fecal, respectivamente.

4.5. Estimação dos parâmetros de degradação e passagem

As equações de degradação (Eq.1) e de passagem (Eqs. 2 e 4) foram ajustadas aos perfis de excreção do Cr, Yb, Eu e Y obtidos após o experimento conduzido por Abreu (2016). Foram aplicadas as recomendações de Pinheiro e Bates (2000) para o ajuste destes modelos não lineares aos perfis, considerando a

interação animal×período como a unidade experimental. Foram utilizadas as funções `gnls` e `nlme` programadas no pacote `nlme` (PINHEIRO et al., 2014) do software estatístico R (R Development Core Team, 2013). A suposição convencional de homocedasticidade foi avaliada com base nas seguintes funções de variância:

$$\sigma_t^2 = \sigma^2 \quad \text{Eq. 6}$$

$$\sigma_t^2 = \sigma_0^2 \exp(2\gamma t_i) \quad \text{Eq. 7}$$

$$\sigma_t^2 = \sigma^2 (f(\theta, t_i))^{2\psi} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\sigma_t^2 = \sigma^2 (\gamma + f(\theta, t_i))^{2\psi} \quad \text{Eq. 9}$$

Em que σ^2 é a variância residual homogênea ($\sigma_t^2 = \sigma^2$) mostrada na Eq. (6). A variância exponencial (Eq. 7) contém a variância residual inicial ($\sigma_t^2 = \sigma_0^2$) associada com o resíduo no tempo inicial ($t = 0$) que aumenta exponencialmente ao longo do tempo a uma taxa γ (1/hora). A Eq. (8) ou *variance power* contém a variância residual ($\sigma_t^2 = \sigma^2$) escalonada pela potência (ψ) da média esperada, $f(\theta, t_i)$. À função de variância da Eq. (8) é adicionada uma constante para as situações quando $\hat{f}(\hat{\theta}, t_i) = 0$ e assim formando a Eq. (9) ou *constant power variance*. Também foi ajustada a correlação dos resíduos na matriz residual (CAR1) do pacote `nlme` do R (PINHEIRO et al., 2014), pelo fato de as medidas das concentrações de Cr, Yb, Eu e Y serem tomadas de maneira repetida no tempo para a mesma unidade experimental.

O modelo ou combinações de modelos que melhor se ajustaram aos perfis de degradação e passagem foram avaliados por meio do cômputo dos critérios de informação de Akaike (1974) corrigido para o número de parâmetros e o tamanho amostral (AICc; SUGIURA, 1978) e medidas dele derivadas, como as diferenças entre os valores de AICc para os diferentes modelos, as probabilidades de verossimilhança e as razões de evidência (BURNHAM e ANDERSON, 2004). Além disso, a decisão acerca do melhor modelo a descrever o perfil será feita com base nas recomendações adicionais descritas por Pinheiro e Bates (2000), Vieira

et al. (2012) e Araujo et al. (2015), a saber: convergência do algoritmo, Hessiano positivo definido à convergência do algoritmo, estimativas de parâmetros com seus respectivos erros-padrão estimados, $k < \lambda$ e $k_d < \lambda_a$ e, caso dois ou mais modelos fossem equiprováveis então a melhor escolha recaiu sobre o modelo com menor número de parâmetros ou maior simplicidade algébrica para modelos com igual número de parâmetros.

4.6. Cálculo da massa ruminal de fibra (Q_{FDN})

A massa ruminal de fibra foi calculada a partir das estimativas dos parâmetros de degradação e passagem obtidas após o ajuste dos modelos GNG1 e GN aos perfis de excreção dos indicadores Cr, Eu e Yb (marcadores usados para fibra da silagem de milho) e Y (marcador usado para a fibra do farelo de soja e concentrado). Assim para cada um dos j ingredientes da dieta foi obtido um respectivo montante de fibra ruminal e assim somados:

$$Q_{FDN} = \sum_j \left\{ F_{FDN_j} \left[A_{FDN_j} \left\{ \sum_{i=1}^{N_j} \left[\lambda_j^{i-1} / (\lambda_j + k_{d_j})^i \right] + \lambda_j^{N_j} / \left[(\lambda_j + k_{d_j})^{N_j} (k_j + k_{d_j}) \right] \right\} + U_{FDN_j} (N_j / \lambda_j + 1 / k_j) \right] \right\}. \quad \text{Eq. 10}$$

De igual forma, com base no modelo GN obtido segundo a dedução descrita por Silva (2014):

$$Q_{FDN} = \sum_j \left\{ F_{FDN_j} A_{FDN_j} / (\lambda_j + k_{d_j}) \sum_{i=1}^{N_j} \left[\lambda_j / (\lambda_j + k_{d_j}) \right]^{i-1} + F_{FDN_j} U_{FDN_j} N_j / \lambda_j \right\}. \quad \text{Eq. 11}$$

4.7. Cálculo da quantidade diária de fibra digerida (\bar{D}_{FDN_f})

A quantidade diária de fibra digerida foi calculada com base na cinética de degradação e passagem dos alimentos empregados na confecção das dietas. Como foram analisados os modelos GNG1 e GN para descrição dos perfis de excreção dos indicadores, procedeu-se ao cálculo da quantidade ruminal de fibra digerida a partir do modelo GNG1 da seguinte forma,

$$\bar{D}_{FDN_f} = \sum_j \left\{ F_{FDN_j} A_{FDN_j} k_{d_j} \sum_{i=1}^{N_j} \left[\lambda_j^{i-1} / (\lambda_j + k_{d_j})^i \right] + \lambda_j^{N_j} / \left[(\lambda_j + k_{d_j})^{N_j} (k_j + k_{d_j}) \right] \right\}, \quad \text{Eq. 12}$$

e com base no modelo GN segundo a dedução descrita por Silva (2014) a seguir:

$$\bar{D}_{FDN_f} = \sum_j \left\{ F_{FDN_j} A_{FDN_j} k_{d_j} / (\lambda_j + k_{d_j}) \sum_{i=1}^{N_j} \left[\lambda_j / (\lambda_j + k_{d_j}) \right]^{i-1} \right\} \quad \text{Eq. 13}$$

Convém ressaltar que os j –ésimos componentes dietéticos silagem de milho (marcada com Cr, Eu e Yb), farelo de soja (marcado com Y) ou concentrado (marcado com Y) feito de milho moído e farelo de soja foram aplicados às duas equações conforme o caso. Calculada a digestão ruminal de fibra, aplicou-se o coeficiente de digestibilidade intestinal sobre os carboidratos fibrosos que escaparam da digestão no rúmen (SNIFFEN et al., 1992; FOX et al., 2004), sendo a quantidade diária digerida no trato gastrointestinal equivalente, para ambos os casos (GNG1 e GN), a:

$$\bar{D}_T = \bar{D}_{FDN_f} + 0,2 \left(\sum_j F_{FDN_j} A_{FDN_j} - \bar{D}_{FDN_f} \right) \quad \text{Eq. 14}$$

Os consumos médios de fibra dos alimentos, bem como as massas corporais dos animais foram preditos a partir de modelos lineares mistos para os dados de Virgínio Júnior (2014), por meio do ajuste da Eq. (15) aos dados de consumo e massa corporal registrados nos quadrados latinos simultâneos:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + a_j + \tau_k + \alpha\tau_{ik} + e_{ijk} \quad \text{Eq. 15}$$

Em que y_{ijk} corresponde ao consumo do j -ésimo animal (a_j) observado durante o k -ésimo período (τ_k), quando lhe foi ofertado o i -ésimo nível de fibra (α_i) na dieta. A interação $\alpha\tau_{ik}$ é fixa, conforme o produto de seus fatores fixos, μ é uma constante inerente ao modelo e a_j e e_{ijk} são efeitos aleatórios com valores esperados iguais a zero e variâncias σ_a^2 e σ^2 , respectivamente. A unidade experimental (SUBJECT) na Eq. 15 corresponde ao a_j e foi assim especificado na sentença REPEATED do PROC MIXED do SAS. Portanto, os consumos e os pesos preditos foram dados pelo melhor preditor não viciado a seguir:

$$E[y_{ijk}|a_j] = \mu + \alpha_i + a_j + \tau_k + \alpha\tau_{ik}, \forall \alpha\tau_{jk} \quad \text{Eq. 16}$$

O mesmo procedimento foi adotado para estimação do consumo de fibra do experimento de Tamy (2015), conforme a equação a seguir:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + a_j + e_{ij} \quad \text{Eq. 17}$$

Em que y_{ij} corresponde ao consumo do j -ésimo animal registrado para cada um dos $i = 1, 2, 3$ a até 8 dias (τ_i) consecutivos usados para estimação do consumo voluntário de fibra. Desta forma, o consumo médio foi dado pelo melhor preditor linear não viciado a seguir:

$$E[y_{ij}|a_j] = \sum_i n_{ij}(\mu + \tau_i + a_j)/n_{.j}, \forall j \quad \text{Eq. 18}$$

As massas corporais para o experimento de Tamy (2015) não foram tomadas com repetição, sendo apenas registrada uma única massa para cada animal em cada período de coleta pré-abate, o que não permitiu predição e os cálculos não foram efetuados sobre os valores observados de massa corporal.

4.8. Avaliação do poder preditivo dos modelos

A avaliação do poder preditivo dos modelos foi realizada por meio da combinação de métodos estatísticos empíricos sobre as predições do modelo (TEDESCHI, 2006). As medidas de adequação empregadas na avaliação empírica dos modelos foram o fator de eficiência do modelo (FEM), intervalos de confiança para os parâmetros (MITCHELL, 1997) e o teste de hipótese conjunta para o intercepto e inclinação (NETER et al., 1996; DENT e BLACKIE, 1979; MAYER et al, 1994). Também foram utilizadas técnicas adicionais que permitiram avaliar a precisão, como o coeficiente de correlação de concordância ou CCC (LIN, 1989), o viés médio ou MB (COCHRAN e COX, 1957) e o quadrado médio do erro de predição ou MSEP (BIBBY e TOUTENBURG, 1977). Os valores de MSEP foram expandidos em três frações para representar erros na tendência central, erros devido à regressão e erros devido a distúrbios (ou erros aleatórios), ou seja, variância que não pode ser explicada pela regressão linear (THEIL, 1961). As estimativas dessas medidas foram obtidas por meio do software MES obtido em <http://nutritionmodels.com/mes.html>.

5. RESULTADOS

Os diferentes modelos representados pela combinação de Eqs. (1), (6), (7) e (8) foram ajustados aos perfis de degradação *in vitro* da matéria orgânica fibrosa dos alimentos que compunham as dietas experimentais. Foram listados apenas os três melhores valores para os critérios de informação e medidas dele derivadas, o que permitiu discriminar o melhor ou melhores ajustes e a escolha do modelo mais verossímil (Tabela 2). O modelo exponencial simples, isto é, quando $\lambda \rightarrow \infty$, com variância homogênea (Eq. 6) apresentou maior verossimilhança aos perfis do farelo de milho. Tal combinação também se mostrou mais verossímil para três silagens de milho fornecidas a alguns grupos de animais (SM G6, SM G4 e SM G3, Tabela 2). O modelo de degradação G2G1 (Eq. 1) com variância homogênea (Eq. 6) teve maior verossimilhança ao explicar os perfis *in vitro* da fibra do farelo de soja. As silagens SM1, SM2 e SM4 apresentaram perfis de degradação que puderam ser explicados pelo modelo G3G1 com variância homogênea. Para as demais silagens, o modelo de degradação G5G1 (Eq. 1) com variância homogênea foi o mais adequado aos perfis de SM G1, SM G2 e SM G5; para a SM3 o melhor ajuste foi obtido com o modelo G5G1 (Eq. 1) com função de variância escalonada (Eq. 8).

Tabela 2. Critérios de informação ($AICc$) e suas funções derivadas (Δ , w e ER) para os diferentes modelos ajustados aos perfis de degradação *in vitro* da matéria orgânica fibrosa dos alimentos empregados

| Alimentos | Modelo ¹ | Variância ² | $AICc$ | Δ^3 | w^4 | ER^5 | θ^6 |
|-----------------------|---------------------|------------------------|--------|------------|-------|--------|------------|
| FM [†] | Exp [*] | Hom | -50,0 | 0,0 | 0,354 | 1 | 4 |
| | Exp | Hom+cor | -49,7 | 0,3 | 0,305 | 1 | 5 |
| | Exp | SC | -47,5 | 2,5 | 0,102 | 3 | 5 |
| FS [†] | G2G1 [†] | Hom | -50,9 | 0,0 | 0,349 | 1 | 5 |
| | G3G1 | Hom | -49,4 | 1,5 | 0,165 | 2 | 5 |
| | G4G1 | Hom | -48,1 | 2,8 | 0,247 | 4 | 5 |
| SM 1 [†] | G3G1 [†] | Hom | -59,9 | 0,5 | 0,146 | 1 | 5 |
| | G4G1 | Hom | -60,2 | 0,2 | 0,169 | 1 | 5 |
| | G5G1 | Hom | -60,4 | 0,0 | 0,187 | 1 | 5 |
| SM 2 [†] | G3G1 [†] | Hom | -92,5 | 0,8 | 0,166 | 1 | 5 |
| | G4G1 | Hom | -93,1 | 0,2 | 0,224 | 1 | 5 |
| | G5G1 | Hom | -93,3 | 0,0 | 0,248 | 1 | 5 |
| SM 3 [†] | G3G1 | SC | -44,8 | 0,1 | 0,295 | 1 | 6 |
| | G4G1 | SC | -44,9 | 0,0 | 0,310 | 1 | 6 |
| | G5G1 [†] | SC | -44,3 | 0,6 | 0,230 | 1 | 6 |
| SM 4 [†] | G3G1 [†] | Hom | -89,6 | 1,0 | 0,111 | 2 | 5 |
| | G5G1 | Hom | -90,5 | 0,1 | 0,174 | 1 | 5 |
| | G6G1 | Hom | -90,6 | 0,0 | 0,183 | 1 | 5 |
| SM G1-G2 [#] | G5G1 [†] | Hom | -28,8 | 0,3 | 0,293 | 3 | 5 |
| | G6G1 | Hom | -29,1 | 0,0 | 0,482 | 2 | 5 |
| | G7G1 | Hom | -27,8 | 1,3 | 0,486 | 2 | 5 |
| SM G3 [#] | Exp [*] | Hom | -5,3 | 0,0 | 0,486 | 2 | 4 |
| | G9G1 | Hom | -2,1 | 3,2 | 0,475 | 2 | 5 |
| | G10G1 | Hom | -2,3 | 3,0 | 1,000 | 1 | 5 |
| SM G4 [#] | Exp [*] | Hom | -27,5 | 0,0 | 0,440 | 1 | 4 |
| | G1G1 | Hom | -25,2 | 2,3 | 0,139 | 3 | 5 |
| | G2G1 | Hom | -25,0 | 2,5 | 0,126 | 3 | 5 |
| SM G5 [#] | G4G1 | Hom | -18,8 | 0,0 | 0,177 | 6 | 5 |
| | G5G1 [†] | Hom | -18,5 | 0,3 | 0,186 | 5 | 5 |
| | G7G1 | Hom | -18,8 | 0,0 | 0,354 | 3 | 5 |
| SM G6 [#] | Exp [*] | Hom | -16,8 | 0,0 | 0,146 | 1 | 4 |
| | G4G1 | Hom | -16,5 | 0,3 | 0,126 | 1 | 5 |
| | G6G1 | Hom | -16,5 | 0,3 | 0,126 | 1 | 5 |

[†]Degradabilidade *in vivo* (VIRGÍNIO JR., 2014): fubá de milho (FM); farelo de soja (FS); silagens de milho ofertadas nos períodos experimentais (SM1, SM2, SM3 e SM4). [#]Quantidade de fibra ruminal (TAMY, 2015): silagens de milho oferecidas a cada grupo de animais abatidos (SM-G1:G2, SM-G3, SM-G4, SM-G5 e SM-G6). ¹Modelos testados: exponencial simples (Exp) e bicompartimentais com distribuição gamma (GNG1) com diferentes ordens de dependência do tempo (N) no primeiro compartimento; ²Funções de variância testadas: homogênea (Hom) e escalonada (SC) com ou sem correlação (cor). Estrutura de variância testada: autoregressiva contínua. ³Diferença entre os valores de $AICc$; ⁴Probabilidade de verossimilhança; ⁵Razão de evidência para cada modelo testado; ⁶Número de parâmetros dos modelos testados. *Modelo escolhido para representar os comportamentos da cinética da digestão dos nutrientes.

Cabe salientar que o modelo escolhido para a SM3 não foi o que obteve o melhor ajuste, mas o de terceira colocação, pois, os ajustes dos modelos com menor ordem de dependência apresentaram estimativas para $\lambda \rightarrow k$, o que violou uma das pressuposições básicas para o modelo de degradação GNG1.

Após a escolha do modelo com melhor ajuste aos perfis de degradação da fibra de cada alimento e respeitando os critérios de escolha pré-estabelecidos, o modelo escolhido foi ajustado novamente para registro das estimativas dos parâmetros. Os ajustes foram exitosos, pois se alcançaram estimativas pontuais e por intervalo para os parâmetros de degradação de interesse (Tabela 3). A razão entre o maior e o menor valor para a fração A_{FDN} das silagens foi de 1,51:1, embora os intervalos de confiança não foram disjuntos. De igual forma, apesar das diferenças pontuais na razão entre o máximo e o mínimo de U_{FDN} , ou seja, 1,92:1, os intervalos de confiança não são mutuamente exclusivos. No entanto, alguns perfis de silagem de milho melhor interpretados por modelo exponencial renderam estimativas da taxa de digestão da fibra com intervalos de confiança disjuntos para algumas silagens (Tabela 3).

Os perfis de excreção fecal gerados pela dosagem das fibras marcadas das silagens de milho e do concentrado (FS e FM) aos animais possibilitaram os ajustes dos modelos monocompartimental e bicompartimental descritos pelas Eqs. (2), (3), (4) e (5). Com base nos critérios de informação e medidas deles derivadas, entre os vários ajustes, foram selecionados os três melhores ajustes para cada um dos dois modelos, o que possibilitou avaliar e escolher dentre do conjunto de modelos ajustados, os que apresentaram maior verossimilhança e estimativas de parâmetros inferíveis sobre a cinética de trânsito das partículas pelo trato gastrointestinal dos animais (Tabela 4).

O modelo monocompartimental de cinética de trânsito (GN) representado pela Eqs. (2) e (5) com $N= 2$ possibilitou melhor ajuste para quase todos marcadores, com exceção do Cr mordente, ao qual melhor se ajustou o modelo com $N = 3$. O ajuste *variance power* ou *variância escalonadas* representada pela Eq. (8) foi o mais verossímil para os marcadores da silagem de milho (Eu, Cr e Yb), para o marcador do concentrado o melhor ajuste de variância foi proporcionado pela *constant power variance*. Com relação ao efeito aleatório foi observado efeito aleatório nos parâmetros C_0 e λ de todos marcadores, no entanto com matriz diagonal (D) para os marcadores Eu, Cr e Y e matriz de covariância completa (S) para o marcador Yb.

O melhor ajuste para o modelo bicompartimental GNG1 expresso pelo conjunto das Eqs. (3), (4) e (5) ocorreu para $N = 3$, independente do marcador usado, seja marcador de fibra de volumoso (Eu, Cr e Yb) ou de fibra de concentrado (Y). As funções de variância que melhor propiciaram interpretação dos perfis dos marcadores com o modelo GN foi a *variance power* para a silagem de milho (Eu, Cr e Yb). O melhor ajuste para o Y (concentrado) foi proporcionado pela *constant power variance*, descrita pela Eq. (9). O efeito aleatório foi o mesmo para o Eu e o Cr, sendo atribuído aos parâmetros C_0 e k com matriz diagonal (D); para o Y foi importante o efeito aleatório atribuído aos parâmetros C_0 e k com matriz de covariância completa (S) ou também chamada de não estruturada (Tabela 4).

Tabela 3. Estimativas dos parâmetros dos modelos de degradação escolhidos para representar os perfis de degradabilidade dos alimentos estudados

| Variáveis | Modelo | Valores estimados \pm metade da amplitude do intervalo de confiança (95% IC) | | | |
|-----------------------|----------|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | A_{FDN}^1 | U_{FDN}^2 | k_d^3 | λ^4 |
| FM [†] | Exp.Hom | 0,730 \pm 0,2329 | 0,061 \pm 0,2564 | 0,026 \pm 0,0185 | ∞ |
| FS [†] | G2G1 Hom | 0,841 \pm 0,0748 | 0,057 \pm 0,0561 | 0,108 \pm 0,1015 | 0,239 \pm 0,1892 |
| SM1 [†] | G3G1 Hom | 0,608 \pm 0,0930 | 0,343 \pm 0,0803 | 0,038 \pm 0,0244 | 0,300 \pm 0,2313 |
| SM2 [†] | G3G1 Hom | 0,683 \pm 0,0344 | 0,322 \pm 0,0292 | 0,038 \pm 0,0070 | 0,368 \pm 0,0993 |
| SM3 [†] | G5G1 SC | 0,555 \pm 0,1425 | 0,389 \pm 0,1400 | 0,067 \pm 0,0612 | 0,466 \pm 0,2280 |
| SM4 [†] | G3G1 Hom | 0,608 \pm 0,0328 | 0,317 \pm 0,0270 | 0,046 \pm 0,0116 | 0,307 \pm 0,0936 |
| SM-G1:G2 [#] | G5G1 Hmo | 0,574 \pm 0,0546 | 0,449 \pm 0,0476 | 0,040 \pm 0,0164 | 0,436 \pm 0,1790 |
| SM-G3 [#] | Exp.Hom | 0,838 \pm 0,5375 | 0,234 \pm 0,5897 | 0,017 \pm 0,0241 | ∞ |
| SM-G4 [#] | Exp.Hom | 0,748 \pm 0,1382 | 0,321 \pm 0,1528 | 0,019 \pm 0,0084 | ∞ |
| SM-G5 [#] | G5G1 Hm | 0,599 \pm 0,0739 | 0,439 \pm 0,0626 | 0,056 \pm 0,0502 | 0,340 \pm 0,2142 |
| SM-G6 [#] | Exp.Hom | 0,774 \pm 0,2529 | 0,338 \pm 0,2795 | 0,019 \pm 0,0147 | ∞ |

[†]Alimentos do estudo de digestibilidade *in vivo* (VIRGÍNIO JR., 2014): fubá de milho (FM); farelo de soja (FS); silagens de milho ofertadas nos quatro períodos experimentais (SM1, SM2, SM3 e SM4). [#]Alimentos do estudo da quantidade de fibra ruminal (TAMY, 2015): silagens de milho utilizadas nos diferentes períodos de avaliação de consumo de cada grupo de animais abatidos (SM-G1:G2, SM-G3, SM-G4, SM-G5 e SM-G6). ¹Fração potencialmente degradável da matéria orgânica fibrosa; ²Fração indegradável da matéria orgânica fibrosa; ³Taxa de digestão; ⁴Taxa de digestão assintótica tempo dependente.

Tabela 4. Critério de informação ($AICc$) e funções derivadas (Δ , w , ER) dos modelos ajustados aos perfis de cinética de trânsito da fibra

| Marcador | Modelo ¹ | Variância ² | u^3 | $AICc$ | Δ^4 | w^5 | ER^6 | θ^7 |
|----------|---------------------|------------------------|------------------|---------|------------|-------|--------------------|------------|
| Eu | G2 | CP+C | C_0 | -982,1 | 12,9 | 0,002 | 633 | 21 |
| | G2* | VP+C | C_0, λ D | -995,0 | 0,0 | 0,978 | 1 | 21 |
| | G2 | VP+C | C_0, λ S | -986,7 | 8,3 | 0,015 | 63 | 22 |
| Cr | G3* | VP+C | C_0, λ D | 4862,5 | 0,0 | 0,585 | 1 | 21 |
| | G3 | VP+C | C_0, λ D | 4863,9 | 1,4 | 0,290 | 2 | 22 |
| | G3 | Hom+C | C_0, λ D | 4865,6 | 3,1 | 0,124 | 5 | 20 |
| Yb | G2 | VP+C | C_0, λ D | -971,0 | 9,3 | 0,009 | 105 | 21 |
| | G2 | VP+C | C_0, λ S | -973,2 | 7,1 | 0,028 | 35 | 22 |
| | G2* | VP+C | C_0, λ S | -980,3 | 0,0 | 0,960 | 1 | 22 |
| Y | G2 | VP+C | tt | -23,1 | 321,6 | 0,000 | 7×10^{64} | 20 |
| | G2* | CP+C | C_0, λ D | -321,6 | 0,0 | 0,810 | 1 | 22 |
| | G2 | CP+C | C_0, λ S | -318,7 | 2,9 | 0,190 | 4 | 23 |
| Eu | G3G1 | VP+C | tt | -994,9 | 16,9 | 0,000 | 4675 | 27 |
| | G3G1 | CP+C | C_0, k D | -1009,7 | 2,1 | 0,259 | 3 | 27 |
| | G3G1* | VP+C | C_0, k D | -1011,8 | 0,0 | 0,741 | 1 | 25 |
| Cr | G3G1 | VP+C | C_0 | 4874,8 | 7,0 | 0,028 | 33 | 24 |
| | G3G1* | VP+C | C_0, k D | 4867,8 | 0,0 | 0,914 | 1 | 25 |
| | G3G1 | VP+C | C_0, k S | 4873,3 | 5,5 | 0,058 | 16 | 26 |
| Yb | G2G1 | VP+C | C_0 | -951,6 | 143,5 | 0,000 | 1×10^{31} | 24 |
| | G2G1 | CP+C | C_0 | -949,5 | 145,6 | 0,000 | 4×10^{31} | 25 |
| | G3G1* | VP+C | k | -1095,1 | 0,0 | 1,000 | 1 | 24 |
| Y | G3G1 | CP+C | C_0, k D | 24,5 | 5,5 | 0,032 | 16 | 26 |
| | G3G1* | CP+C | C_0, k S | 19,0 | 0,0 | 0,508 | 1 | 27 |
| | G3G1 | VP+C | C_0, k S | 19,2 | 0,2 | 0,460 | 1 | 26 |

¹Os modelos testados foram o monocompartimental tempo dependente (GN) e o bicompartimental (GNG1), ambos com distribuição gama. ²Funções de variância: VP= *variance power*; CP= *constant power variance*; C= correlação auto regressiva continua. ³Efeito aleatório: S= matriz de covariância completa; D= matriz de variâncias diagonal; ⁴Variação ou diferença entre dos valores de $AICc$; ⁵Probabilidade de verossimilhança dos modelos testados; ⁶Razão de evidência para os modelos e funções de variância testados; ⁷Número de parâmetros dos modelos testados. Modelo escolhido para representar a cinética de trânsito.

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros (C_0 , λ , tt , γ) do modelo GN de cinética de trânsito ajustado aos perfis de excreção dos indicadores de partículas fibrosas dos alimentos estudados

| Marcador | Modelo ¹ | Fibra na dieta | Valores estimados \pm metade da amplitude do intervalo de confiança (95% IC) | | | |
|----------|-------------------------------|----------------|--|--------------------|---------------------|--------------------|
| | | | C_0 | λ | tt | γ |
| Eu | G2; VP+C; C_0 , λ D | T1 | 65,2 \pm 10,91 | 0,053 \pm 0,0073 | 9,781 \pm 0,8437 | 0,047 \pm 0,0259 |
| | | T2 | 58,7 \pm 10,67 | 0,053 \pm 0,0072 | 7,587 \pm 0,3510 | 0,045 \pm 0,0264 |
| | | T3 | 39,9 \pm 9,59 | 0,062 \pm 0,0085 | 7,415 \pm 0,3888 | 0,024 \pm 0,0184 |
| | | T4 | 38,1 \pm 9,33 | 0,066 \pm 0,0090 | 6,733 \pm 0,5970 | 0,016 \pm 0,0148 |
| Cr | G3; VP+C; C_0 , λ D | T1 | 1885,4 \pm 384,37 | 0,048 \pm 0,0067 | 12,803 \pm 3,3751 | 2,775 \pm 1,8146 |
| | | T2 | 1568,4 \pm 347,43 | 0,058 \pm 0,0078 | 11,092 \pm 3,0823 | 3,307 \pm 1,7492 |
| | | T3 | 1022,6 \pm 282,46 | 0,086 \pm 0,0110 | 16,154 \pm 2,1869 | 5,076 \pm 1,3352 |
| | | T4 | 1010,4 \pm 287,93 | 0,084 \pm 0,0112 | 13,147 \pm 2,2906 | 2,820 \pm 1,4536 |
| Yb | G2; VP+C; C_0 , λ S | T1 | 63,8 \pm 14,55 | 0,070 \pm 0,0130 | 8,000 \pm 1,3904 | 0,049 \pm 0,0242 |
| | | T2 | 48,3 \pm 14,05 | 0,089 \pm 0,0149 | 8,004 \pm 1,4458 | 0,039 \pm 0,0196 |
| | | T3 | 28,9 \pm 13,67 | 0,098 \pm 0,0155 | 7,062 \pm 0,4468 | 0,020 \pm 0,0144 |
| | | T4 | 31,2 \pm 13,74 | 0,088 \pm 0,0144 | 3,939 \pm 0,1740 | 0,022 \pm 0,0159 |
| Y | G2; CP+C; C_0 , λ D | T1 | 35,9 \pm 29,34 | 0,042 \pm 0,0203 | 7,222 \pm 3,8085 | 0,199 \pm 0,2034 |
| | | T2 | 25,4 \pm 18,01 | 0,061 \pm 0,0218 | 9,899 \pm 1,5440 | 0,304 \pm 0,0822 |
| | | T3 | 47,5 \pm 17,39 | 0,074 \pm 0,0176 | 7,704 \pm 0,1467 | 0,335 \pm 0,0764 |
| | | T4 | 40,8 \pm 16,98 | 0,081 \pm 0,0189 | 10,414 \pm 0,5191 | 0,332 \pm 0,0740 |

¹GN= modelo monocompartimental tempo-dependente; VP= *variance power*; CP= *constant power variance*; C= correlação auto regressiva contínua, S= matriz de covariância completa; D= matriz de variâncias diagonal.

Tabela 6, Estimativas dos parâmetros (C_0 , λ , k , tt , γ) dos modelos de cinética de trânsito escolhidos para representar os perfis de excreção dos indicadores de partículas fibrosas dos alimentos estudados

| Marcador | Modelo | Fibra na dieta | Valores estimados \pm metade da amplitude do intervalo de confiança (95% IC) | | | | |
|----------|------------------------------|----------------|--|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | | | C_0 | λ | k | tt | γ |
| Eu | G3G1; VP+C; C_0 , k D | T1 | 68,3 \pm 11,44 | 0,221 \pm 0,0507 | 0,032 \pm 0,0079 | 6,141 \pm 1,5157 | 0,035 \pm 0,0256 |
| | | T2 | 58,4 \pm 10,83 | 0,218 \pm 0,0504 | 0,039 \pm 0,0102 | 5,427 \pm 1,4067 | 0,044 \pm 0,0266 |
| | | T3 | 38,7 \pm 9,61 | 0,193 \pm 0,0548 | 0,056 \pm 0,0196 | 4,396 \pm 1,5344 | 0,027 \pm 0,0192 |
| | | T4 | 38,1 \pm 9,42 | 0,219 \pm 0,0627 | 0,051 \pm 0,0152 | 3,003 \pm 1,7741 | 0,015 \pm 0,0149 |
| Cr | G3G1 VP+C; C_0 , k D | T1 | 2359,3 \pm 533,69 | 0,122 \pm 0,0351 | 0,018 \pm 0,0069 | 10,781 \pm 4,5340 | 1,830 \pm 1,8842 |
| | | T2 | 1701,8 \pm 420,57 | 0,125 \pm 0,0404 | 0,028 \pm 0,0116 | 8,874 \pm 4,2300 | 2,872 \pm 1,8676 |
| | | T3 | 1040,2 \pm 294,40 | 0,110 \pm 0,1215 | 0,084 \pm 0,2212 | 11,081 \pm 3,9277 | 4,900 \pm 1,4200 |
| | | T4 | 1001,0 \pm 306,18 | 0,130 \pm 0,0736 | 0,064 \pm 0,0631 | 9,716 \pm 3,8286 | 2,840 \pm 1,5128 |
| Yb | G3G1; VP+C; C_0 , k | T1 | 74,5 \pm 17,84 | 0,680 \pm 0,1679 | 0,028 \pm 0,0138 | 7,576 \pm 0,5179 | 0,026 \pm 0,0246 |
| | | T2 | 55,8 \pm 13,58 | 1,071 \pm 0,3880 | 0,034 \pm 0,0146 | 7,777 \pm 0,3674 | 0,019 \pm 0,0183 |
| | | T3 | 31,2 \pm 32,67 | 3,6 \pm 193,1 | 0,041 \pm 0,0171 | 7,607 \pm 21,4533 | 0,019 \pm 0,0174 |
| | | T4 | 31,5 \pm 8,77 | 0,571 \pm 0,3630 | 0,052 \pm 0,0218 | 4,582 \pm 1,9405 | 0,028 \pm 0,0210 |
| Y | G3G1; VP+C; C_0 , k S | T1 | 40,0 \pm 23,55 | 0,182 \pm 0,1228 | 0,024 \pm 0,0170 | 3,199 \pm 7,2308 | 0,232 \pm 0,0798 |
| | | T2 | 25,3 \pm 19,21 | 0,194 \pm 0,1333 | 0,047 \pm 0,0396 | 4,496 \pm 5,4791 | 0,297 \pm 0,0706 |
| | | T3 | 52,0 \pm 19,64 | 0,501 \pm 0,1406 | 0,037 \pm 0,0153 | 5,864 \pm 0,8798 | 0,298 \pm 0,0714 |
| | | T4 | 39,9 \pm 17,83 | 0,159 \pm 0,0883 | 0,102 \pm 0,1061 | 3,593 \pm 2,5494 | 0,315 \pm 0,0601 |

¹GNG1= modelo bicompartimental tempo dependente; VP= *variance power*, CP= *constant power variance*; C= correlação auto regressiva continua, S= matriz de covariância completa; D= matriz de variâncias diagonal.

Considerando os modelos que melhor permitiram a interpretação dos dados de cinética de trânsito, procedeu-se à estimação dos parâmetros dos diferentes modelos GN (Tabela 5) e GNG1 (Tabela 6). Assim, com base nas estimativas apresentadas nas Tabelas 3, 5 e 6 foi possível à obtenção das quantidades de fibra presentes no rúmen (Figura 4) e da quantidade de fibra digerida diariamente pelos animais (Figura 6, 7). Estas variáveis foram também escalonadas para a massa corporal (Figura 5). Estas figuras nos fornecem visibilidade da acurácia e precisão das predições feitas a partir dos diferentes modelos, pois a linha de unidade ($Y = X$) baliza como uma referência para identificarmos se a nuvem de dados indica subestimação, superestimação ou acurácia das predições conforme a aderência da nuvem à linha de unidade.

O valor final de Q_{FDN} predito a partir dos diferentes modelos foi comparado aos valores observados por meio do quadrado médio do erro de predição (QMEP), coeficiente de correlação de concordância (CCC), viés médio, fator de eficiência do modelo e o teste da hipótese conjunta $H_0: a = 0 \text{ \& } b = 1$ para cada uma das regressões dos valores observados sobre os preditos, o que tornou possível avaliar a capacidade de predição dos modelos GN e GNG1 com estimativas produzidas para a cinética de trânsito dos indicadores de partículas fibrosas (Tabela 7). Assim, com base no ferramental de avaliação empregado, é possível depreender que o melhor ajuste foi obtido pelo modelo GNG1 com o Eu. O Eu também proporcionou boas predições a partir do modelo GN. Inclusive as predições do Eu com o modelo GNG1 e com o modelo GN apresentaram intervalos de confiança justapostos para o CCC. O único indicador que se mostrou competitivo com o Eu foi o Cr no modelo GNG1, julgado como a melhor combinação para o CCC.

Ao representar graficamente os resultados é possível verificar que o modelo GNG1, cujas estimativas paramétricas foram obtidas com o Eu, proporcionou reta sobreposta à reta de unidade para menores consumos de fibra, ocorrendo leve distanciamento à medida que aumentou o consumo de fibra (Figura 4.b). A reta gerada a partir das predições do modelo GN com a cinética de trânsito do Eu não chega a sobrepor a linha de unidade (Figura 4.a), no entanto, não apresenta distanciamento tão expressivo como o observado, por exemplo, para o Yb (Figura 4, e 4.f). É possível

observar também que as predições do modelo GNG1 com base na cinética de trânsito do Cr proporcionou reta de valores estimados acima da linha de unidade, o que permite demonstrar que neste caso os modelos superestimaram a massa ruminal de fibra (Figura 4.d).

Os mesmos conjuntos de valores preditos para Q_{FDN} e valores observados de Q_{FDN} foram escalonados para massa corporal dos animais e em seguida comparados às predições (Tabela 8). A combinação GNG1 com Eu apresentou melhor ajuste com base no QMEP, Viés médio, FEM e CCC. No entanto, para esta última medida de avaliação os demais modelos avaliados (GN com base no Eu, Yb e Cr, bem como GNG1 com base em Yb e Cr) avaliados abrangem o mesmo intervalo de confiança (Tabela 8). O conjunto GNG1 com Eu também foi o único para o qual não foi rejeitada a hipótese conjunta para o intercepto e a inclinação entre os valores observados sobre os preditos. Ao avaliar as retas de unidade quando comparadas às proporcionadas pelas regressões dos valores observados sobre os preditos é nítido que para menores massas ruminais de fibra observadas há equivalência entre as predições, mas à medida que as massas ruminais de fibra aumentam, há um incremento no viés médio pelo distanciamento dos valores observados da linha de unidade, conforme demonstrado pela regressão (Figura 5. b). O modelo GN com predições feitas a partir da excreção de Eu também apresentou bom poder preditivo, pois a regressão dos valores observados sobre os preditos segue muito próximo à linha de unidade (Figura 5. a). Já as predições do modelo GNG1 com base na excreção do Cr apresentou comportamento diferente dos demais casos, superestimando massa ruminal de fibra (Figura 5. d). As demais combinações (marcadores e modelos) se demonstraram menos precisas nas estimativas.

Tabela 7. Medidas de avaliação empírica dos modelos de predição da quantidade ruminal de fibra (Q_{NDF} , g) a partir das estimativas dos parâmetros de trânsito digestivo obtidos com diferentes marcadores da fibra do volumoso

| Modelo | Marcador | Medidas empíricas de avaliação dos modelos | | | | | |
|--------|----------|--|--------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------|---|
| | | QMEP ¹ | CCC ² | Viés Médio ³ g/dia | Viés Médio (% do obs.) | FEM ⁴ | Valor P ⁵ H0: a = 0 & b = 1 |
| GN | Eu | $8,91 \times 10^5$ | $0,528 \pm 0,1134$ | 337 | 12,3 | 0,258 | 0,107 |
| | Cr | $1,36 \times 10^6$ | $0,383 \pm 0,0998$ | 766 | 27,9 | - 0,131 | < 0,001 |
| | Yb | $1,87 \times 10^6$ | $0,233 \pm 0,0776$ | 999 | 36,4 | - 0,558 | < 0,001 |
| GNG1 | Eu | $8,24 \times 10^5$ | $0,550 \pm 0,1156$ | 158 | 5,7 | 0,313 | 0,456 |
| | Cr | $1,06 \times 10^6$ | $0,572 \pm 0,1162$ | -379 | -13,9 | 0,140 | 0,009 |
| | Yb | $1,31 \times 10^6$ | $0,380 \pm 0,0997$ | 732 | 26,7 | -0,095 | < 0,001 |

¹Quadrado médio do erro de predição (BIBBY e TOUTENBURG, 1977).

²Coefficiente de correlação de concordância (LIN, 1998).

³Cochran e Cox (1954).

⁴Fator de eficiência do modelo (LOAGUE e GREEN, 1991; ZACHARIAS et al., 1996).

⁵Hipótese de Meyer et al. (1994).

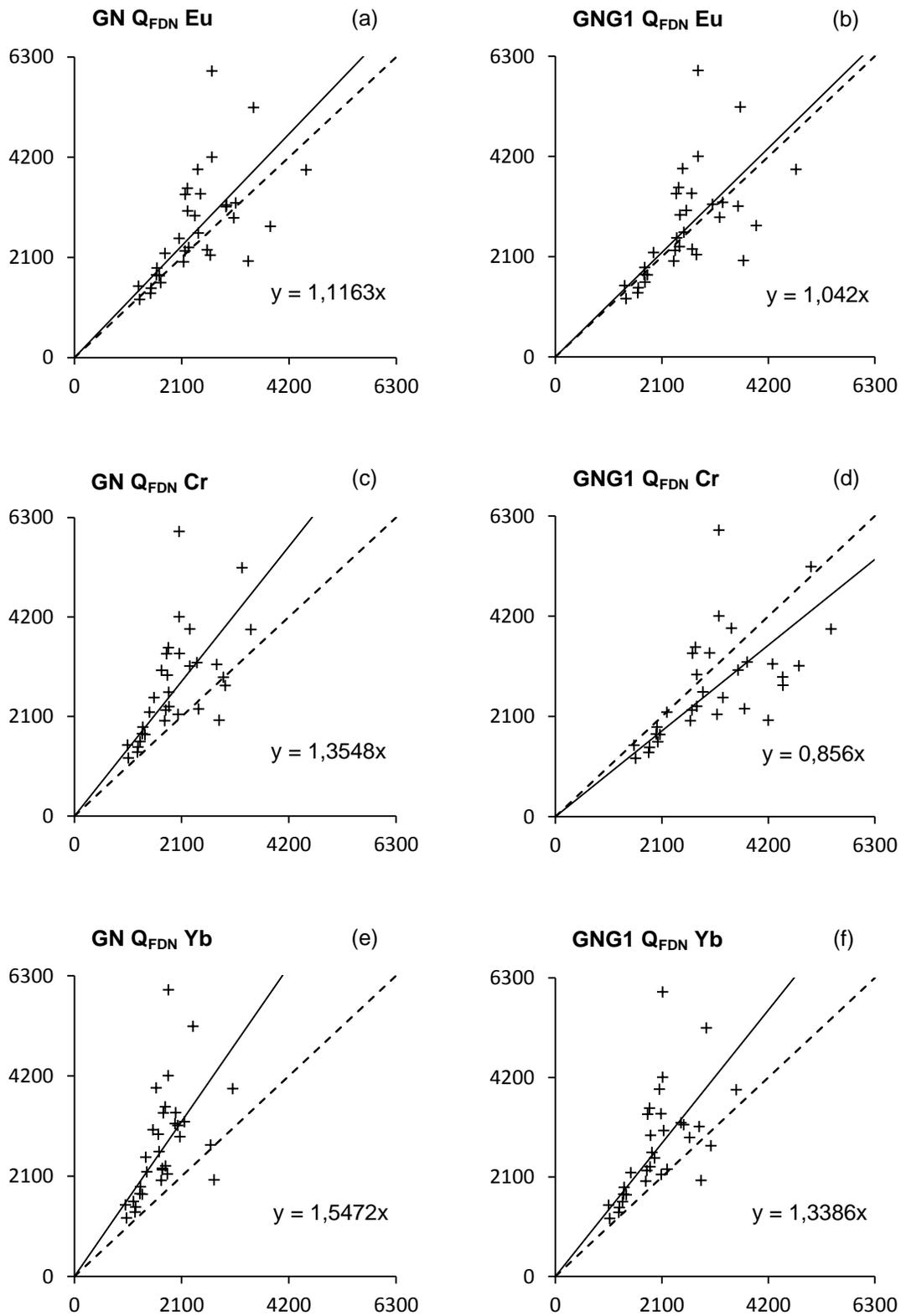


Figura 4: Gráficos dos valores observados e preditos para Q_{FDN} obtidos a partir dos ajustes proporcionados pela combinação dos diferentes modelos com os marcadores de fibra.

Tabela 8. Indicadores da avaliação dos modelos de predição da quantidade ruminal de fibra escalonada (Q_{FDN} . g) para a massa corporal (kg) a partir das estimativas dos parâmetros de trânsito digestivo obtidos com diferentes marcadores da fibra do volumoso

| Modelo | Marcador | Medidas empíricas de avaliação dos modelos | | | | | |
|--------|----------|--|------------------|---------------------------------|---------------------------|------------------|---|
| | | QMEP ¹ | CCC ² | Viés médio ³ g/kg | Viés médio (% do obs.) | FEM ⁴ | Valor P ⁵ H0: a = 0 & b = 1 |
| GN | Eu | 9,32 | 0,197 ± 0,1222 | 1,243 | 11,954 | -0,162 | 0,030 |
| | Cr | 16,00 | 0,102 ± 0,0781 | 2,834 | 27,246 | -0,994 | < 0,001 |
| | Yb | 20,64 | 0,114 ± 0,0695 | 3,595 | 34,565 | -1,573 | < 0,001 |
| GNG1 | Eu | 8,34 | 0,231 ± 0,1429 | 0,521 | 5,011 | -0,038 | 0,169 |
| | Cr | 10,46 | 0,122 ± 0,1251 | -1,331 | -12,801 | -0,304 | 0,011 |
| | Yb | 15,28 | 0,097 ± 0,0722 | 2,744 | 26,384 | -0,904 | < 0,001 |

¹Quadrado médio do erro de predição (BIBBY e TOUTENBURG, 1977).

²Coefficiente de correlação de concordância (LIN, 1998).

³Cochran e Cox (1954).

⁴Fator de eficiência do modelo (LOAGUE e GREEN, 1991; ZACHARIAS et al., 1996).

⁵Hipótese de Meyer et al. (1994).

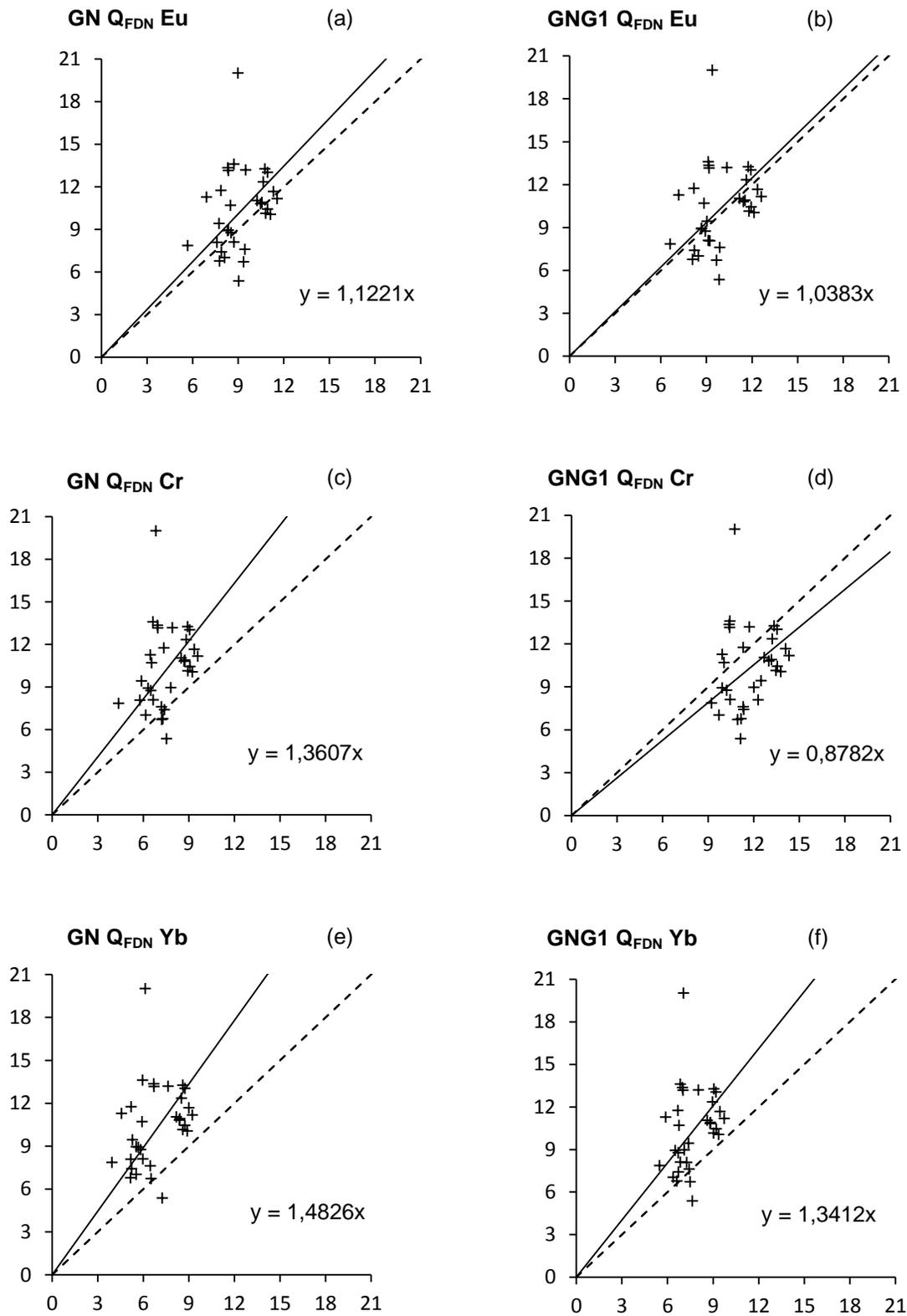


Figura 5. Gráficos de valores de Q_{FDN} observados comparados aos valores preditos obtidos a partir dos ajustes proporcionados pela combinação dos diferentes modelos com os marcadores de fibras, escalonados para massa corporal.

As melhores predições da quantidade de fibra diária (g/dia) digerida no trato gastrointestinal dos animais (D_{FDN}) foram obtidas com o modelo GNG1 com base na cinética de trânsito das partículas marcadas com o Eu, seguida das predições feitas pela combinação GN e Eu. No entanto, todos os modelos apresentaram forte evidência de rejeição da hipótese geral $H_0: a=0$ e $b = 1$ (Tabela 9). Quando apresentado graficamente torna-se visível que a linha de valores preditos pelo modelo GNG1 com o marcador Eu segue bem próxima à linha de unidade (Figura 6. b). Contudo, para os demais conjuntos (modelos e marcadores) a reta de valores preditos se distancia muito da linha de unidade (Figura 6).

Para os valores escalonados das predições a partir do modelo GNG1 com base nas estimativas dos parâmetros da cinética de trânsito do Eu e do Cr apresentaram predições comparáveis para a quantidade D_{FDN} . Contudo, a mesma limitação de rejeição da hipótese geral H_0 foi observada para todas as estimativas ou predições escalonadas (Tabela 10). Quando observadas graficamente é notório que o comportamento das retas de regressão sem intercepto para os valores escalonados se distanciaram em muito da linha de unidade para todas as predições (Figura 7). Cabe salientar, no entanto, que as estimativas de CCC foram muito superiores às das predições realizadas com as predições não escalonadas (Tabelas 9 e 10).

Tabela 9. Medidas de avaliação empírica dos modelos de predição da quantidade diária digerida de fibra (D_{FDN} , g/dia) a partir das estimativas dos parâmetros de trânsito digestivo obtidos com diferentes marcadores da fibra do volumoso

| Modelo | Marcador | Medidas empíricas de avaliação dos modelos | | | | | |
|--------|----------|--|--------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------|---|
| | | QMEP ¹ | CCC ² | Viés Médio ³ g/dia | Viés Médio (% do obs,) | FEM ⁴ | Valor P ⁵ H0: a = 0 & b = 1 |
| GN | Eu | $9,85 \times 10^4$ | $0,816 \pm 0,0373$ | 204 | 17,135 | 0,715 | < 0,001 |
| | Cr | $1,53 \times 10^5$ | $0,710 \pm 0,0511$ | 264 | 22,203 | 0,558 | < 0,001 |
| | Yb | $1,86 \times 10^5$ | $0,670 \pm 0,0580$ | 318 | 26,715 | 0,464 | < 0,001 |
| GNG1 | Eu | $6,42 \times 10^4$ | $0,879 \pm 0,0248$ | 141 | 11,826 | 0,814 | < 0,001 |
| | Cr | $1,17 \times 10^5$ | $0,786 \pm 0,0416$ | 242 | 20,354 | 0,663 | < 0,001 |
| | Yb | $1,57 \times 10^5$ | $0,707 \pm 0,0546$ | 266 | 22,325 | 0,547 | < 0,001 |

¹Quadrado médio do erro de predição (BIBBY e TOUTENBURG, 1977).

²Coefficiente de correlação de concordância (LIN, 1998).

³Cochran e Cox (1954).

⁴Fator de eficiência do modelo (LOAGUE E GREEN, 1991; ZACHARIAS et al., 1996).

⁵Hipótese de Meyer et al. (1994).

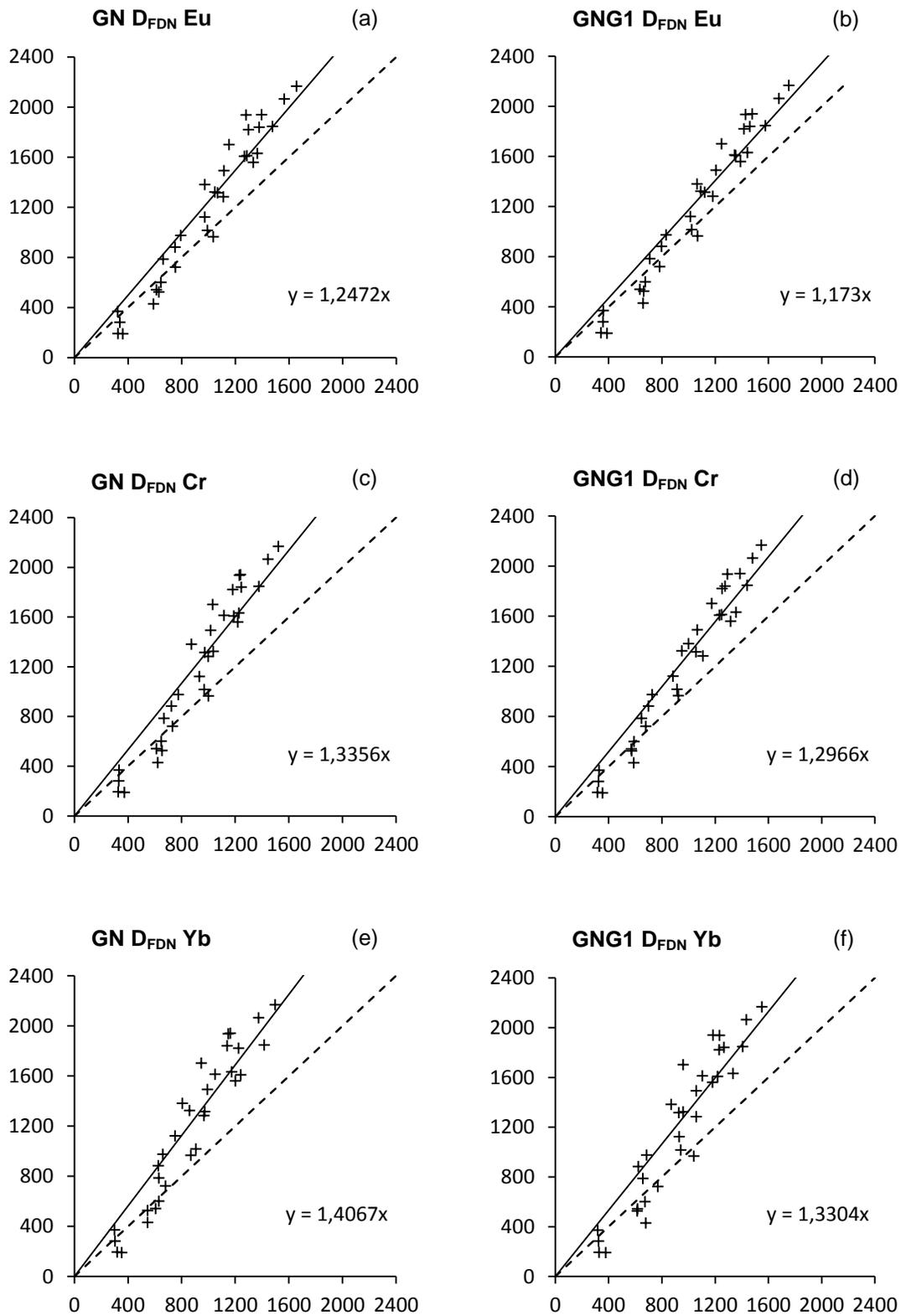


Figura 6. Gráficos de valores de D_{FDN} observados comparados aos valores preditos obtidos a partir dos ajustes proporcionados pela combinação dos diferentes modelos com os marcadores de fibras.

Tabela 10, Indicadores da avaliação dos modelos de predição da quantidade diária digerida de fibra (D_{FDN} , g/dia) escalonada para a massa corporal (kg) e com base nas estimativas dos parâmetros de trânsito digestivo obtidos com diferentes marcadores da fibra do volumoso

| Modelo | Marcador | Medidas empíricas de avaliação dos modelos | | | | | |
|--------|----------|--|------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|--|
| | | QMEP ¹ | CCC ² | Viés médio ³ g/kg | Viés médio (% do obs) | FEM ⁴ | Valor P ⁵ H0:a = 0 & b = 1 |
| GN | Eu | 1,45 | 0,802 ± 0,0361 | 0,775 | 17,825 | 0,703 | < 0,001 |
| | Cr | 2,20 | 0,698 ± 0,0483 | 0,994 | 22,869 | 0,550 | < 0,001 |
| | Yb | 2,63 | 0,662 ± 0,0563 | 1,185 | 27,259 | 0,462 | < 0,001 |
| GNG1 | Eu | 0,92 | 0,874 ± 0,0231 | 0,538 | 12,372 | 0,811 | < 0,001 |
| | Cr | 1,65 | 0,783 ± 0,0402 | 0,903 | 20,778 | 0,663 | < 0,001 |
| | Yb | 2,25 | 0,695 ± 0,0517 | 1,005 | 23,128 | 0,540 | < 0,001 |

¹Quadrado médio do erro de predição (BIBBY e TOUTENBURG, 1977).

²Coefficiente de correlação de concordância (LIN, 1998),

³COCHRAN e COX (1954).

⁴Fator de eficiência do modelo (LOAGUE e GREEN, 1991; ZACHARIAS et al., 1996).

⁵Hipótese de Meyer et al. (1994).

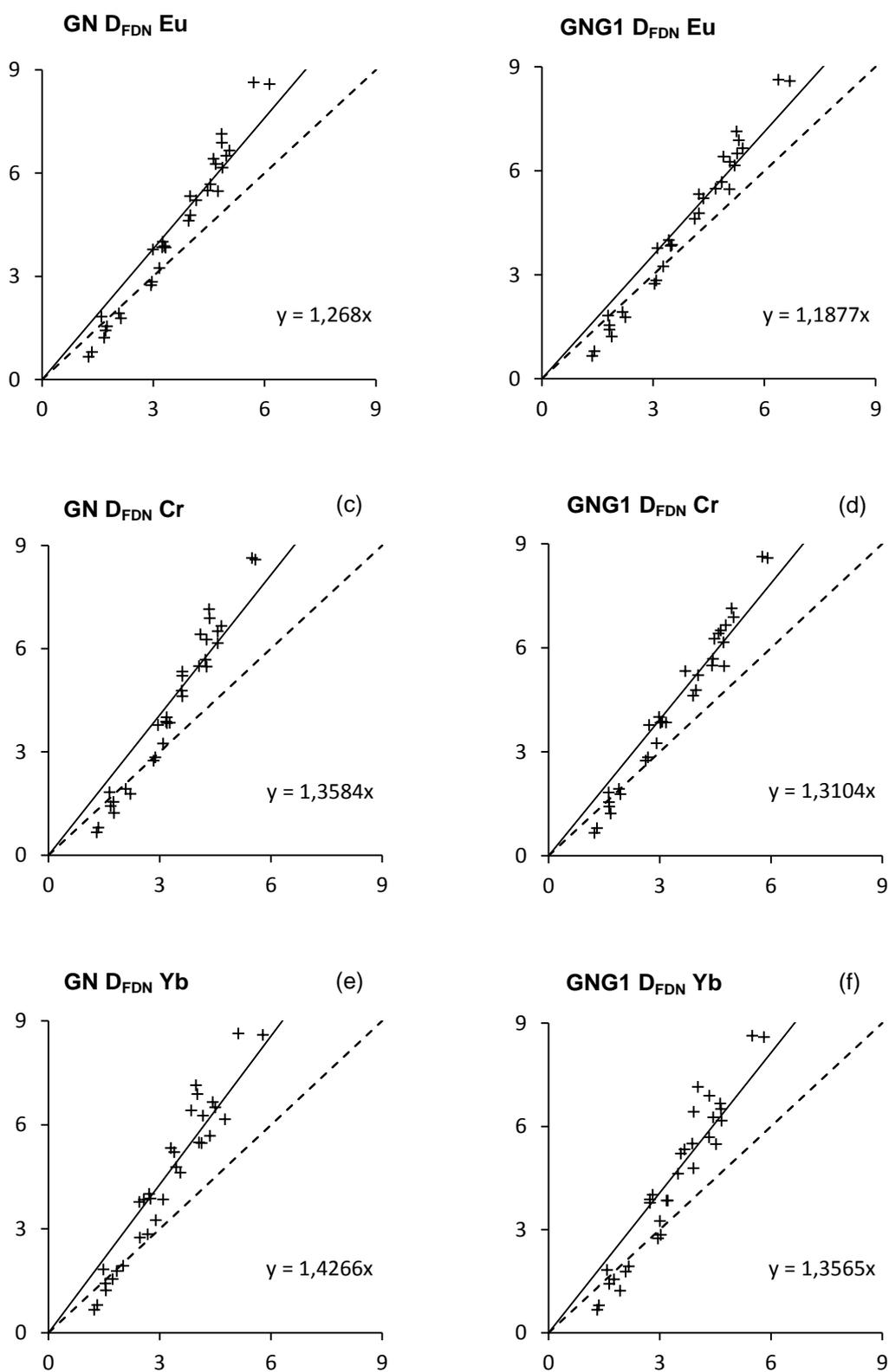


Figura 7. Gráficos de valores de D_{FDN} observados comparados aos valores preditos obtidos a partir dos ajustes proporcionados pela combinação dos diferentes modelos com os marcadores de fibras, escalonados para massa corporal.

De forma geral, independente dos marcadores empregados para explicar a cinética de trânsito, foi possível identificar a superioridade do modelo GNG1 tanto para as estimativas de massa ruminal como também para as estimativas da quantidade de fibra digerida, com base no indicador Eu. Sempre que comparado o modelo GN com o modelo GNG1, usando os mesmos dados de cinética de trânsito proporcionado por determinado marcador, o modelo GNG1 apresentou melhor ajuste (Figuras 4, 5, 6 e 7). Quando a comparação foi feita entre os diferentes marcadores de fibra combinando tanto com o modelo GN quanto com o modelo GNG1, o modelo GNG1 com os dados de cinética de trânsito estimados a partir do Eu foi superior em todos os casos, salvo em um único caso (Estimativas de Q_{FDN} escalonadas), para o qual a medida de avaliação CCC apresentou valores dentro do mesmo intervalo para todas as combinações modelo x marcador (Tabela 10), isto é, os intervalos foram justapostos.

Os dados de cinética de trânsito proporcionados pelo marcador Eu foram mais acurados e precisos ao explicar o trânsito de partículas fibrosas pelo trato gastrintestinal de animais ruminantes (Tabelas 7, 8, 9 e 10). Isto se verificou independentemente do modelo avaliado, pois em todas as avaliações, os ajustes proporcionados pelos dados de cinética de trânsito obtidos com o Eu associado ao modelo GN se apresentaram superiores aos ajustes proporcionados pelos demais marcadores de fibra ainda que considerado as predições com o modelo GNG1

6. DISCUSSÃO

Analogamente aos fenômenos naturais de crescimento biológico, os perfis de degradação da fibra obtidos por meio de estudos *in vitro* e *in situ* apresentados como digestão acumulada do substrato (MERTENS, 1977), destacam-se por apresentar padrão característico de crescimento sigmoide, representado por um atraso inicial suave seguido por um crescimento exponencial que desacelera e atinge uma fase assintótica (DHANOA et al. 1995; MERTENS, 1977; VAN MILGEN et al. 1991). Então MERTENS (1973, 1977) propôs que esse atraso inicial (*lag time* ou período de latência) observado em estudos de cinética da digestão é possível de ocorrer em condições naturais na câmara de fermentação de animais ruminantes. Supostamente a fração do alimento ao chegar ao ambiente ruminal passa por um tempo de preparo para iniciar a digestão (VAN MILGEN et al., 1991). Estão envolvidos nesse processo de preparação a hidratação, diluição de substâncias possíveis inibidoras do crescimento microbiano, a adesão e a efetiva colonização do substrato (MERTENS, 2005), Mertens (1973, 1977) também apontou que o componente de fibra deve ser dividido em frações potencialmente digestível (A_{FDN}) e indigestível (U_{FDN}), em que A_{FDN} passa de um estado não preparado para digestão para um estado pronto para ser digerida, enquanto que o U_{FDN} permanece intacto e o seu desaparecimento ruminal será inteiramente dependente do escape, não ocorrendo o seu

desaparecimento por digestão e absorção (ELLIS et al., 1979; ØRSKOV e Mc DONALD, 1979; FRANCE et al., 1990; VAN MILGEN et al., 1991).

Os microrganismos ligados ou aderidos às partículas da fase sólida são os responsáveis pela digestão enzimática da fibra, dessa forma, é crucial para o início da digestão a formação de biofilmes sobre as partículas do alimento no interior do compartimento rúmimo-reticular (Russell, 2002; Wilson, 1993). A formação do biofilme, em parte, é dependente de restrições físicas, ou seja, da área de superfície da partícula alimentar disponível para colonização, assim como também do rompimento da cutina e da arquitetura estrutural dos tecidos vegetais provocadas por ação mecânica (movimentos mastigatórios durante a ingestão/ruminação), dessa maneira, favorecendo a acessibilidade de microrganismos ao conteúdo e aos polímeros de carboidratos iniciando assim o processo de digestão (Pond et al. 1984; 1987; Sutherland, 1989; Wilson, 1993).

Essas etapas envolvidas na preparação das partículas para início da digestão demandam tempo, e na presente abordagem assumiu-se que a vida útil das partículas nessa fase (fase *lag*) segue distribuição gama (Vieira et al., 2008a). Esta função densidade de probabilidade gama descreve a probabilidade de que, num determinado tempo t , uma parte do substrato disponível e potencialmente degradável ainda precisa ser preparada para a digestão. Após essa fase inicial de hidratação, à medida que a fração do alimento potencialmente digestível vai se tornando disponível para a digestão, o processo de digestão passa a ser explicado por uma cinética de primeira ordem (van Milgen et al., 1991; Mertens, 2005; Vieira et al., 2008a).

Sendo o modelo GNG1 de degradação baseado nas teorias relatadas anteriormente, e sobre os princípios mecanicistas da dinâmica de partículas do rúmen, juntamente com recursos estocásticos que conferem a flexibilidade adequada ao modelo (Vieira et al., 2008a), destaco esse modelo por ter apresentado a maior capacidade de representar o padrão sigmóide observado para perfis de degradação *in vitro* da matéria orgânica fibrosa. O ajuste desse modelo proporciona estimativas mais confiáveis dos parâmetros inerentes ao processo de digestão. O processo de modelagem pode levar a situações em que um número excessivo de parâmetros é empregado para a descrição da realidade (Bard, 1974). Isto pode levar a uma situação em que se verifica um excesso de parâmetros em relação ao número de observações (Matis e

Hartley, 1971), o que pode ter favorecido, em alguns casos (4 de 11, Tabela 3), a escolha do modelo exponencial.

Esclarecidos alguns fenômenos que coordenam a degradação da matéria orgânica fibrosa, e definidas quais foram as melhores estimativas para a sua taxa de digestão (k_d), há a necessidade de contabilizar os efeitos dos fenômenos de atraso sobre o trânsito das partículas fibrosas pelo TGI dos ruminantes. Segundo Waldo et al, (1972), desde que o consumo de fibra e os parâmetros da cinética de digestão e passagem sejam conhecidos, o coeficiente de digestibilidade da fibra e o efeito de enchimento desta fração alimentar sobre o rúmen podem ser estimados. O que foi feito no presente estudo empregando-se os modelos descritos por Vieira et al. (2008b) e por Silva (2014).

Balch e Johnson (1950) já relatavam em seus trabalhos que 80% do tempo médio de retenção de partículas era atribuído ao processo de retenção ruminorreticular. Embora Blaxter et al. (1956) tivessem conhecimento do referido trabalho, talvez tenham partido de falsa premissa em relação aos compartimentos mais influentes na retenção da digesta no ruminante; para Blaxter et al. (1956), o atraso das partículas era associado a dois compartimentos físicos distintos, separados anatomicamente, o que os levaram a associar o primeiro compartimento de retenção das partículas alimentares ao rúmen e o segundo ao abomaso.

A ideia de uma retenção ruminorreticular seguida por uma retenção pós-rúmen chegou a ser propagada por uma série de artigos publicados por Grovum e Williams (1973a; b; c; d) entre outros. No entanto, uma crítica para a abordagem de Grovum se baseia no fato de que um segmento tubular não pode ser tratado como um compartimento de retenção (SILVA, 2014), Uma pressuposição razoável e a de considerar que um segmento tubular deve apresentar trânsito laminar com fluxo contínuo (ELLIS et al., 1994).

Com base nas considerações teóricas propostas por Hungate (1966) e Sutherland (1989), dois momentos de permanência das partículas fibrosas são associados à câmara de fermentação (rúmen-retículo), o momento em que elas se encontra com maior tamanho e menor densidade formando o sobrenadante (raft) e quando as partículas já estão com tamanho menor e aptas a escapar pelo orifício retículo-omasal (*pool* de partículas escapáveis). Essa onda de

retenção de partículas proporcionada pelos dois compartimentos de retenção seguida de trânsito linear pelo restante do sistema digestório normalmente é exibida pelos perfis de excreção dos marcadores de fibra. A interpretação Ellis-Matis, portanto, é a de que os perfis de excreção refletem a retenção no rúmen-retículo e o aparecimento do indicador se dá após a viagem da partícula que o contém entre o orifício retículo-omasal e o reto (ELLIS et al., 1979; ELLIS et al., 1994).

A cada novo momento de alimentação ocorre o acréscimo de novas partículas fibrosas no rúmen, com as contrações do órgão, essas novas partículas se misturam com partículas mais velhas que já ocupavam o local. As correntes de líquido promovidas pela contração do órgão exercem papel importante na hidratação e colonização contínua do material fibroso sobrenadante (HUNGATE, 1966; WATTIAUX et al., 1991, 1992b). As partículas recém-ingeridas iniciam o processo de preparação e colonização enquanto que as partículas mais velhas já se encontram em processo adiantado de digestão. À medida que os processos de digestão (processos mecânicos e enzimáticos) evoluem sobre esse montante heterogêneo de partículas, ocorre a redução em seu tamanho médio e torna-se menos provável permanência das partículas da ingesta no sobrenadante. As partículas, agora com o tamanho reduzido, migram para fase fluida do conteúdo ruminal e continuam sendo digeridas enquanto permanecem no *pool* de partículas escapáveis (SUTHERLAND, 1989).

Tendo conhecimento da complexidade do que foi mencionado acima, onde ocorre simultaneamente a preparação e digestão da partícula recém-ingerida seguida da migração das partículas do *raft* para o segundo compartimento, levando em conta a possibilidade de a partícula escapar a qualquer momento do RR, são notáveis os indícios da natureza estocástica dos procedimentos envolvendo a cinética de trânsito no TGI de ruminantes (MATIS, 1987; ELLIS, 1979; VAN SOEST, 1994). Sendo assim, são compreensíveis os melhores ajustes obtidos com o modelo GNG1 em relação ao modelo GN, em função da concepção de dois *pools* distintos no rúmen (VIEIRA et al., 2008b; REGADAS FILHO et al., 2014).

Com relação às estimativas da quantidade de massa de fibra no rúmen e quantidade de fibra digerida no TGI de ruminantes, cabe mencionar o uso da

fração indigestível (U_{FDN}) medida diretamente por meio de métodos de evacuação do rúmen por cânulas ruminais ou por medições após o abate (ELLIS et al., 1994; CANNAS et al., 2003; HUHTANEN et al., 2007). Estas técnicas podem fornecer estimativas da taxa de passagem e da massa de fibra no rúmen. A técnica de abate de animais já foi utilizada em 1950 por Paloheimo e Makela (1959) no intuito de estimar o tempo de retardo da lignina em diferentes segmentos do trato digestivo de vacas. No entanto, a partir do trabalho de Robinson et al. (1987), a técnica de evacuação do rúmen em animais fistulados tem sido preferida em relação ao abate, pois evita a eliminação das unidades experimentais.

Um pré-requisito das duas técnicas (evacuação e abate) é que os animais estejam em estado estacionário ou que a evacuações sejam realizadas com frequência suficiente para permitir uma estimativa exata e precisa da quantidade da massa ruminal de fibra, Para Cannas et al. (2003), a metodologia de esvaziamento do rúmen apresenta limitações, segundo os autores, o momento de quantificação do conteúdo pode não representar o padrão diário de conteúdo do rúmen. De igual forma, Huhtanen et al. (2007) observaram que em bovinos alimentados duas vezes ao dia, as taxas de digestão e passagem apresentaram estimativas superestimadas quando foram obtidas pela evacuação do rúmen antes da alimentação da manhã e subestimadas quando a evacuação ocorreu 4 h após alimentação. O autor sugere que para animais alimentados duas vezes ao dia no intervalo de 12 h, o espaço de tempo entre os momentos de esvaziamento seja dividido em três, com intervalos de tempo equidistantes. O ideal é que pelo menos uma evacuação seja realizada perto do mínimo de conteúdo de fibra no rúmen e o outro perto do valor máximo de conteúdo de fibra no rúmen. Ainda segundo estes autores, ao comparar as estimativas da digestibilidade da FDN geradas a partir dos parâmetros obtidos pela evacuação do rúmen ou pela cinética de trânsito da fibra marcada (excreção duodenal da fibra marcada com Yb) e aplicadas tais estimativas no modelo de digestão de dois compartimentos (ALLEN e MERTENS, 1988) resultaram em estimativas bem próximas aos valores observados, Por outro lado, ao estimar a digestibilidade da FDN sobre um modelo de *pool* único, com base nos parâmetros obtidos pela evacuação do rúmen, a digestão da fibra foi subestimada. Estes resultados corroboram

com o uso de estimativas de parâmetros obtidas a partir da cinética de trânsito com o uso de marcadores de fibra para os cálculos da massa ruminal de fibra e da quantidade de fibra digerida.

Estudos com marcadores de fibra são utilizados desde as décadas de 70 e 80, sua utilização na nutrição de ruminantes tem a finalidade de monitorar aspectos relacionados com a cinética de trânsito da fração sólida da digesta. A escolha de um bom indicador deve atender algumas exigências tais como ligações estáveis e fortes com a partícula fibrosa. Além disso, é necessário conhecer a eficiência de ligação de cada metal com a fibra a ser estudada, visto que as forças de ligação podem ser muito diferentes entre metais e a matriz fibrosa a ser marcada (FAHEY e JUNG, 1983; GALYEAN et al., 1987; POND et al., 1987; OWENS e HANSON, 1992). O Eu apresenta ligações estáveis com a fibra por sua afinidade aos centros de coordenação na partícula fibrosa (VAN SOEST et al., 1986; BERNARD e DOREAU, 2000), o que pode explicar o melhor comportamento preditivo dos modelos GNG1 e GN na predição de Q_{FDN} e D_{FDN} .

O Cr é comumente utilizado como marcador de fibra para estudos em cinética de trânsito, ele proporciona ligações fortes e estáveis com a fibra das forragens. Porém, o tratamento com concentrações de cromo entre 80 a 100 mg/g de fibra pode reduzir drasticamente a digestibilidade da fibra e também promover um aumento de densidade das partículas de fibra tratada e acarretar maior atraso no trânsito da partícula marcada (EHLE, 1984; EHLE et al., 1984), O processo de tratamento da fibra com o Cr mordente, descrito por Udén et al. (1980), modifica as características físico-químicas das partículas tornando-as mais indigestível (RAMANZIN et al., 1991; MOORE et al., 1992; OWENS e HANSON, 1992; OFFNER e DIXON, 2000). Dessa forma, a marcação da fibra com elevadas doses de cromo interfere na digestão microbiana da partícula e certamente influencia a dinâmica dos processos de trânsito, o que acarretar vícios na estimação da taxa de passagem com uso desse indicador nas doses tradicionalmente empregadas (EHLE, 1984; OFFER e DIXON, 2000). Apesar das limitações, o uso do Cr em menor concentração no preparado fibroso resultou em estimativas de trânsito que proporcionaram estimação da digestão e da massa ruminal de fibra quase tão boas quanto o Eu, embora a qualidade de predição com o Eu tenha sido superior no presente estudo.

Outros marcadores comuns para estudos da cinética de trânsito são as terras raras ou lantanídeos. A ligação desse grupo de metais com a fibra promove menos alterações no comportamento da fibra interferindo menos na digestibilidade e na densidade da fibra (TURNBULL e THOMAS, 1987). No entanto, as terras raras podem migrar da fibra originalmente marcada para outras partículas ou até mesmo para a porção líquida da digesta (TEETER et al., 1984). Isto certamente pode ter ocorrido para as estimativas obtidas com o Yb, o que explica o pior poder preditivo registrado para os modelos em que se empregaram as estimativas de trânsito com este marcador.

No estudo do qual se originaram os dados de taxa de passagem aqui utilizados (ABREU, 2016), o Cr apresentou menores estimativas para λ em relação ao Yb e Eu (42,5; 28,8%). O resultado das menores taxas de passagem das partículas complexadas com o Cr foi maior tempo médio de retenção, sendo a diferença entre tais estimativas para o cromo quando comparada ao Yb e Eu foram de 42,4 e 27,2%, respectivamente. Aparentemente, considerando os resultados obtidos no presente estudo, o Eu proporcionou estimativas de parâmetros cinéticos que permitiram estimar com mais acurácia e precisão Q_{FDN} e D_{FDN} se comparados ao Cr e Yb.

Com relação às terras raras, Abreu (2016) relatou que mesmo tratando a fibra marcada a ser fornecida aos animais e tratando suas fezes no intuito de remover marcadores fracamente ligados, o Yb apresentou tempo médio de retenção muito semelhante ao da fase líquida, o que é um indicativo de migração desse indicador para partículas menores. Outros trabalhos (BEAUCHEMIN e BUCHANAN-SMITH, 1989; COMBS et al., 1992; ERDMAN e SMITH, 1985; RICHTER e SCHLECHT, 2006) indicam que o Yb pode migrar para partículas menores e formar complexos insolúveis e proporcionar estimativas pouco confiáveis, o que parece ter sido corroborado pelos resultados do presente estudo.

Já para o Eu, Abreu (2016) identificou que o tempo médio de retenção das fibras marcadas foi semelhante, independente do tratamento fecal utilizado, ou seja, não ocorreu indício de migração do marcador para partículas menores ou mesmo para a fase líquida. Ainda foi relatado pelo autor que o Eu apresentou tempo médio de retenção no rúmen menor do que os do Cr, o que

justifica os melhores ajustes observados ao fazer uso dos perfis de cinética de trânsito do Eu.

7. CONCLUSÃO

Os parâmetros estimados com uso do modelo GNG1 ajustado aos perfis de cinética de trânsito obtidos com o marcador Eu são mais confiáveis para a determinação da massa ruminal de fibra, Nesse estudo as estimativas de digestibilidade da fibra não são confiáveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, M. L. C. **Estudo da cinética de trânsito da fase sólida no trato gastrointestinal de ruminantes quanto à indelebilidade de indicadores.** Campos dos Goytacazes, Rj: UENF, 2016. 144p. Tese (Doutorado em Ciência Animal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2016.
- AFRC, 1993. **Energy and Protein Requirements of Ruminants.** CAB International, Cambridge, UK.
- AKAIKE, H., 1974. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v.19, p. 716-723.
- ALLEN, M.S.; MERTENS, D.R. Evaluating constraints on fiber digestion by rumen microbes. **Journal of Nutrition**, v.118, p.261-270, 1988.
- ARAUJO, R. P. VIEIRA, R. A. M. ROCHA, N. S. ABREU, M. L. C. GLÓRIA, L. S. ROHEM JÚNIOR, N. M. FERNANDES, A. M. Long-term growth of body, body parts and composition of gain of dairy goat wethers. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1321-1340.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 16th ed. Arlington: AOAC, 1998.
- BALCH, C.C., 1950. Factors affecting the utilization of food by dairy cows. I. The rate of passage of food through the digestive tract. **British Journal of Nutrition**, v. 4, p. 361–388.

- BARD, Y., 1974. Nonlinear parameter estimation. **Academic Press**, Inc., New York.
- BEAUCHEMIN, K. A.; BUCHANAN-SMITH J. G. Evaluation of markers, sampling sites and models for estimating rates of passage of silage or hay in dairy cows. **Animal Feed Science and Technology**, v. 27, p. 59-75, 1989.
- BERNARD, L.; DOREAU, M. Use of rare earth elements as external markers for mean retention time measurements in ruminants. **Reproduction Nutrition Development**, v.40, p.89-101, 2000.
- BIBBY, J., TOUTENBURG, H., 1977. Prediction and Improved Estimation in Linear Models. Wiley, Berlin.
- BLAXTER, K.L., GRAHAM, MC.C., WAINMAN, F.W., 1956. Some observations on the digestibility of food by sheep, and on related problems. **British Journal of Nutrition**, v. 10, p. 69–91.
- BROCK, T.D., MADIGAN, M.T., MARTINKO, J.M., PARKER, J. **Biology of microorganisms**. 7th Edition, Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, New Jersey, 1994, 909p.
- BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol. Methods & Res.* 33, 261-304, 2004.
- CANNAS, A., VAN SOEST, P.J., PELL, A.N., 2003. Use of animal and dietary information to predict rumen turnover. **Animal Feed Science and Technology**, v. 106, p. 95-117.
- COCHRAN, W.G., COX, G.M., 1957. **Experimental Design**. Wiley, New York.
- COMBS, D. K.; SHAVER, R. D.; SATTER, L. D. Retention of rare earths by hay particles following incubation in fresh or autoclaved rumen fluid. **Journal of Dairy Science**, v. 75, n. 1, p. 132-139, 1992.
- COMBS, D.K.; SATTER, L.D. Determination of markers in digesta and feces by direct current plasma emission spectroscopy. **Journal Dairy Science**, v.75, p.2176-2183, 1992.

- CZERKAWSKI, J.W. **Degradation of solid feeds in the rumen: spatial distribution of microbial activity and its consequences.** In: MILLIGAN, L.P.; GROVUM, W.L.; DOBSON, A. (Ed.) *Control of digestion and metabolism in ruminants.* New Jersey:Prentice Hall, 1986. p.173-195.
- DENT, J.B., BLACKIE, M.J., 1979. **Systems Simulation in Agriculture.** Applied Science, London.
- DHANOVA, M. S.; SIDONS, R. C.; FRANCE, J.; GALE, D. L. A multicompartimental model to describe marker excretion patterns in ruminant faeces. **British Journal of Nutrition**, v.53, p.663-671, 1985.
- EHLE, F. R. Influence of feed particle density on particulate passage from rumen of Holstein cow. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 67, p. 693-697, 1984.
- ELLIS, W. C., MATIS, J. H., LASCANO, C. Quantitating ruminal turnover. **Federation Proceedings**, 38:2702, 1979.
- ELLIS, W. C.; BEEVER, D. E. Methods for binding rare earths to specific feed particles. In:P.M. Kennedy (Ed.) *Techniques in Particle size analysis of feed and digesta in ruminants.* **Canadian Society of Animal Science.**, p.154–165, 1984.
- ELLIS, W. C.; BEEVER, D. E. Methods for binding rare earths to specific feed particles. In:P.M. Kennedy (Ed.) *Techniques in Particle size analysis of feed and digesta in ruminants.* **Canadian Society of Animal Science.**, p.154–165, 1984.
- ELLIS, W. C.; MATIS, J. H.; HILL, T. M.; MURPHY, M. R. 1994. **Methodology for estimating digestion and passage kinetics of forages.** In *Forage Quality, Evaluation, and Utilization* (Eds G. C. Jr. Fahey, M. Collins, D. R. Mertens e L. E. Moser), pp. 682-756. Madison, WI: American Society of Agronomy.
- ELLIS, W.C., MATIS, J.H., LASCANO, C.E., 1979. Quantitating Ruminal Turnover. **Federation Proceedings**, v. 38, p. 2702-2706.

- ELLIS, W.C., WYLIE, M.J., MATIS, J.H. Validity of specifically applied rare earth elements and compartmental models for estimating flux of undigested plant tissue residues through the gastrointestinal tract of ruminants. **Journal of Animal Science**, V. 80, p. 2753–2758, 2002.
- ELLIS, W.C.; MAHLOOJI, M.; MATIS, J.H. Models for estimating parameters of neutral detergent fiber digestion by ruminal microorganisms. **Journal of Animal Science**, v.83, n.7, p.1591-1601, 2005.
- ERDMAN, R. A.; SMITH, L. W. Ytterbium binding among particle size fractions of forage cell walls. **Journal of Dairy Science**, v.68, p.3071-3075, 1985.
- FAHEY Jr., G. C.; JUNG, H. G. Lignin as a marker in digestion studies: a review. **Journal of Animal Science**, v.57, p.220-225, 1983.
- FRANCE, J., THORNLEY, J.H.M., LOPEZ, S., SIDONS, R.C., DHANOA, M.S., VAN SOEST, P.J., GILL, M. On the two-compartment model for estimating the rate and extent of feed degradation in the rumen. **Journal of Theoretical Biology**, v. 146, p. 269-287, 1990.
- GALYEAN, M. L.; KRYSL, L. I.; ESTELL, R. E. 1987. Marker-based approaches for estimation of fecal output and digestibility in ruminants. Page 96-113. In: **Feed intake by beef cattle: symposium**. Owens, F. N., ed. Oklahoma Agric. Exp. Sm. Misc. Publ. 109. Stillwater.
- GOERING, H. K.; VAN SOEST, P. J. **Forage fiber analysis. Agricultural handbook No. 379**. Washington, D.C.: U.S.D.A., 1970.
- GROVUM, W.L., WILLIAMS, V.J., Rate of passage of digesta in sheep. 4. Passage of marker through the alimentary tract and the biological relevance of rate constants derived from the changes in concentration of marker in faeces. **British Journal of Nutrition**, v. 30, p. 313–329, 1973.
- HALL, M. B.; MERTENS, D. R. In vitro fermentation vessel type and method alter fiber digestibility estimates. **Journal of Dairy Science**, v. 91, n. 1, p. 301-307, Jan 2008.
- HOFMANN, R.R. Anatomy of the gastro-intestinal tract. In: CHURCH, D.C. **The ruminant animal. Digestive physiology and nutrition**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988, p.14-43.

- HUHTANEN, P., ASIKAINEN, U., ARKKILA, M., JAAKKOLA, S., Cell wall digestion and passage kinetics estimated by marker and in situ methods or by rumen evacuations in cattle fed hay 2 or 18 times daily. **Animal Feed Science and Technology**, v. 133, p. 206-227, 2007.
- HUNGATE, R.E. Introduction: the ruminant and the rumen. In: HOBSON, P.N. **The rumen microbial ecosystem**. London. 1988. p.1-19.
- ILLIUS, A.W., GORDON, I.J., 1991. Prediction of intake and digestion in ruminants by a model of rumen kinetics integrating animal size and plant characteristics. **J. Agric. Sci.**, v. 116, p. 145–157.
- JARDIM, J. G., et al. Application of a nonlinear optimization tool to balance diets with constant metabolizability. **Livestock Science**, 158(1–3): 106-117. 2013.
- LIN, L.I.-K., 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. **Biometrics**, v. 45, p. 255–268.
- LUCAS, H.L. Extra-period Latin-square change-over designs. **Journal of Dairy Science**. v. 40, p.225-1957.
- MALAFIA; P. A. M.; FILHO, S. C. V.; VIEIRA, R. A. V. et al. (1998) Cinética ruminal de alguns alimentos investigada por técnicas gravimétricas e metabólicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.27, n.2, p.370-380.
- MATIS, J. H. Gamma time-dependency in Blaxter's compartmental model. **Biometrics**, v.28, p.597-602, 1972.
- MATIS, J. H.; WEHRLY, T. E.; ELLIS, W. C. Some generalized stochastic compartment models for digesta flow. **Biometrics**, v. 45, p. 703-720, 1989.
- MATIS, J.H., HARTLEY, H.O., 1971. Stochastic compartmental analysis: model and least squares estimation from time series data. **Biometrics**, v. 27, p. 77-102.
- MATIS, J.H., The case for stochastic models of digesta flow. **Journal of Theoret. Biol.**, v. 124, p. 371–376, 1987.

- MAYER, D.G., STUART, M.A., SWAIN, A.J., 1994. Regression of real-world data on model output: an appropriate overall test of validity. **Agricultural Systems**, v. 45, p. 93–104.
- MERTENS, D. R. 2005. Rate and extent of digestion. In: Dijkstra, J.; Forbes, J. M.; France, J. (Eds.), **Quantitative Aspects of Ruminant Digestion and Metabolism**, second ed. CAB International, Wallingford, p.13-47.
- MERTENS, D. R. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative study. **Journal of AOAC International**, v. 85, n. 6, p. 1217-1240, 2002.
- MERTENS, D.R. 1976. Principles of modeling and simulation in teaching and research. **Journal of Dairy Science**, v. 60, n. 7, p. 1176-1186.
- MERTENS, D.R., 1973. **Application of theoretical mathematical models to cell wall digestion and forage intake in ruminants**. Ph.D. Dissertation, Cornell University, Ithaca, USA, 217pp.
- MERTENS, D.R., 1977. Dietary fiber components: relationship to the rate and extent of ruminal digestion. *Fed. Proc.* V.36, p. 187–192.
- MERTENS, D.R., 1987. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. **Journal Animal Science**, v.64, p.1548–1558.
- MERTENS, D.R., 1997. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 80, p. 1463–1481.
- MITCHELL, P.L., 1997. Misuse of regression for empirical validation of models. **Agricultural Systems**, v. 54, p. 313–326.
- MOORE, J. A.; POND, K. R.; POORE, M. H.; GOODWIN, T. G. Influence of model and marker on digesta kinetic estimates for sheep. **Journal of Animal Science**, v.70, p.3528-3540, 1992.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. 1996. **Nutrients requirements of beef cattle**. 7. ed. Washington, DC: National Academy Press, 242 p.

- NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger Principles of Biochemistry**. 5th ed. W. H. Freeman: New York, 2008. 1100p.
- NETER, J., KUTNER, M.H., NACHTSHEIM, C.J., WASSERMAN, W., 1996. **Applied Linear Statistical Models**, fifth ed. McGraw-Hill, Boston.
- NOCEK, J.E. In situ and other methods to estimate ruminal protein and energy digestibility: a review. **Jornal of Dairy Science**, v.71, n.8, p.2051-2069, 1998.
- NRC, Nutrient requirements of small ruminants, The National Academies Press, Washington, DC. 2007.
- OFFER, N. W.; DIXON, J. Factors affecting outflow rate from the reticulo-rumen. **Nutrition Abstracts and Reviews (Series B)**, v.70, p.833-844, 2000.
- OFFER, N. W.; DIXON, J. Factors affecting outflow rate from the reticulo-rumen. **Nutrition Abstracts and Reviews (Series B)**, v.70, p.833-844, 2000.
- ØRSKOV, E.R., MCDONALD, I., 1979. Estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. **Journal of Agricultural Science**, v. 92, p. 499-503.
- OWENS, F. N.; HANSON, C. F. External and internal markers for appraising site and extent of digestion in ruminants. **Journal of Dairy Science**, v.75, p.2605-2617, 1992.
- PALOHEIMO, L., MÄKELA, A., 1959. Further studies on the retention time of food in the digestive tract of cows. *Acta Agralia Fennica* v. 94, p. 15–39.
- PELL, A. N.; SCHOFIELD, P.; STONE, W. C. (1994). **Rates of digestion of feeds measured in vitro with computers**. Cornell Nutrition Conference. Proceedings. Cornell University, p.74-81, 1994.
- PINHEIRO, J.C., BATES, D.M., 2000. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. Springer-Verlag Inc., New York.

- POND, K. R.; BURNS, J. C.; FISHER, D. S. 1987. External markers-use and methodology in grazing studies. Page 49 *in* **Proceeding 1st Grazing Livestock Nutrition Conference**. University Wyoming Press, Laramie.
- POND, K. R.; ELLIS, W. C.; AKIN, D. E. Ingestive mastication and fragmentation of forages. **Journal of Animal Science**., v.58 p.1567-1574, 1984.
- POND, K. R.; ELLIS, W. C.; J. H. MATIS, J. H.; FERRIERO, H. M.; J. D. SUTTON, J. D. Compartmental models for estimating attributes of digesta flow in cattle. **British Journal of Nutrition**, v.60, p.571-595, 1988.
- POPPI, D. P.; NORTON, B. W.; MINSON, D. J.; HENDRICKSEN, R. E. The validity of the critical size theory for particles leaving the rumen. **Journal of Agricultural Science**, v.94, p.275-280, 1980.
- RAMANZIN, M.; BITTANTE, G.; BAILONI, L. Evaluation of different chromium mordanted wheat straws for passage rate studies. **Journal of Dairy Science**, v. 74, n. 9, p. 2989-2996, 1991.
- REGADAS FILHO, J.G.L., TEDESCHI, L.O., VIEIRA, R.A.M., RODRIGUES, M.T., 2014. Assessment of the heterogeneous ruminal fiber pool and development of a mathematical approach for predicting the mean retention time of feeds in goats. **Journal of Animal Science**, v. 92, p. 1099-1109.
- RICHTER, H. SCHLECHT, E. Accounting for marker disassociation when modelling time-dependent ruminal escape of particles based on the faecal excretion of Ytterbium. **Animal Feed Science and Technology**, v. 128, n. 1, p. 135-154, 2006.
- ROBINSON, P.H., TAMMINGA, S., VAN VUUREN, A.M., 1987. Influence of declining level of feed intake and varying the proportion of starch in the concentrate on rumen ingesta quantity, composition and kinetics of ingesta turnover in dairy cows, composition and kinetics of ingesta turnover in dairy cows. **Livest. Prod. Sci.**, v. 17, p. 37-62.
- RUSSELL, J. B. **Rumen microbiology and its role in ruminant** nutrition Ithaca, NY, 2002, 119p.

- 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., STROBEL, H.J. 1993. Microbial Energetics. In: FORBES, J.M., FRANCE, J. (Ed.) **Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism**. Cambridge: Cambridge University Press. p.165-186.
- SAS[®] for Mixed Models, Second Edition ed. **SAS** Institute Inc., Cary, USA.
- SILVA, M. C. **Modelos Não lineares para descrição do trânsito de partículas pelo trato digestório do Ruminante: Avaliação de modelos e implicações teóricas**. Campos dos Goytacazes, Rj: UENF, 2016. 82p. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2014.
- SUGIURA, N. Further analysis of the data by Akaike's Information Criterion and the finite corrections. **Communications in Statistics, Theory and Methods**, A7, 13-26, 1978.
- SUTHERLAND, T.M., 1988. Particle separation in the forestomachs of sheep. In: Dobson, A., Dobson, M.H. (Eds.), **Aspects of Digestive Physiology of Ruminants**. Cornell University Press, Ithaca, pp. 43–73.
- SUTHERLAND, T.M., 1989. Particle Separation in the Forestomach of Sheep. **Aspects of Digestive Physiology of Ruminants**, 43-73
- TAMY, W. P. **Predição de conteúdo ruminorreticular e do consumo alimentar em ruminantes domésticos**. Campos dos Goytacazes, Rj: UENF, 2015. 65p. Tese (Doutorado em Ciência Animal). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2015.
- TEDESCHI, L.O., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agric. Syst.**, v. 89, p. 225–247.
- TEETER, R. G.; OWENS, F. N.; MADER, T. L. Ytterbium chloride as a marker for particulate matter in the rumen. **Journal of Animal Science**, v.58, p.465-473, 1984.

- THEIL, H., 1961. **Economic forecasts and policy**. In: Strotz, R., Tinbergen, J., Verdoorn, P.J., Witteveen, H.J. (Eds.), Contributions to Economic Analysis, second ed. North-Holland, Amsterdam, pp. 6–48.
- TURNBULL, G. W.; THOMAS, E. E. Evaluation of Rare-Earth Markers Using an In Vitro Ruminal Fermentation System and Effect of Processing Method on Ruminal Turnover of Sized Corn Particles. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 64, n. 6, p. 1835-1841, 1987.
- UDÉN, P.; COLUCCI, P. E.; VAN SOEST, P. J. Investigation of chromium, cerium and cobalt as markers in digesta. Rate of passage studies. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.31, p.625-632, 1980.
- UDÉN, P.; ROBINSON, P.H.; WISEMAN, J. Use of detergent system terminology and criteria for submission of manuscripts on new, or revised, analytical methods as well as descriptive information on feed analysis and/or variability. *Animal Feed Science and Technology*, v.118, p.181-186, 2005.
- VAN MILGEN, J., MURPHY, M.R., BERGER, L.L., 1991. A Compartmental Model to Analyze Ruminal Digestion. **Journal Dairy Science**, v. 74, p. 2515-2529.
- VAN SOEST, P. J. 1994. **Nutrition ecology of the ruminant**. Ithaca, NY: Cornell University Press, 2nd Ed. 476p.
- VAN SOEST, P. J.; SNIFFEN, C. J.; ALLEN, M. S. 1986. Rumen Dynamics. In: Dobson, A.; Dobson, M. (Eds) **Proceeding of a Satellite Symposium of the 30th International Congress of the International Union of Physiological Sciences**. H. Cornell Univ., p.21- 42, Ithaca, NY.
- VAN SOEST, P.J. Development of a comprehensive system of feed analyses and its application to forages. **Journal of Animal Science**, v.26, n.1, p.119-128, 1967.
- VAN SOEST, P.J.; ROBERTSON, J.B.; LEWIS, B.A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, v. 74, n.10, p.3583-3597, 1991.

- VARGA, G. A.; DANN, H. M.; ISHLER, V. A. The use of fiber concentrations for ration formulation. **Journal Of Dairy Science**, EUA, v. 81, n., p.3063-3074, 1998.
- VIEIRA, R. A. M. et al. Heterogeneity of the digestible insoluble fiber of selected forages in situ. **Animal Feed Science and Technology**, v. 171, n. 2–4, p. 154-166, 2012.
- VIEIRA, R. A. M.; MALAFAIA, P. A. M.; SILVA, J. F. C. et al. (2005) Suplementação na criação de caprinos de corte em pastejo. In: ZOOTECA – VII Congresso Nacional de Zootecnia, 7, **Anais...** Campo Grande, v.1.
- VIEIRA, R. A. M.; TEDESCHI, L. O.; CANNAS, A. A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 1. Estimating parameters of digestion. **Journal of Theoretical Biology**, v. 255, p. 345-356, 2008a.
- VIEIRA, R. A. M.; TEDESCHI, L. O.; CANNAS, A. A generalized compartmental model to estimate the fibre mass in the ruminoreticulum: 2. Integrating digestion and passage. **Journal of Theoretical Biology**, v. 255, p. 357-368, 2008b.
- VIEIRA, R. A.; FERNANDES, A. M. A importância de estudos quantitativos associados à fibra para a nutrição e a alimentação de ruminantes. In: Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia, 43., 2006, João Pessoa. **Anais...**João Pessoa: SBZ, 2006. p.258-290.
- VIEIRA, R.A.M. **Modelos matemáticos para estimativa de parâmetros da cinética de degradação do capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum., cv. mineiro) em diferentes idades de corte**. Viçosa, MG: UFV, 1995. 88p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- VIRGÍNIO JÚNIOR, G.F. **Observações sobre o consumo e a digestibilidade de nutrientes e de energia por bovinos arraçoados com níveis crescentes de fibra**. Viçosa, MG: UFV, 2014. 54p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, 2014.
- WALDO, D.R., SMITH, I.W., COX, L.L., 1972. Model of cellulose disappearance from the rumen. **J. Dairy Sci.**, v. 55, p. 125–129.

- WATTIAUX, M.A., MERTENS, D.R., SATTER, L.D., 1992B. Kinetics of hydration and effect of liquid uptake on specific gravity of small hay and silage particles. **J. Anim. Sci.**, v. 70, p. 3597–3606.
- WATTIAUX, M.A., MERTENS, D.R., SATTER, L.D., 1991. Effect of source and amount of fiber on kinetics of digestion and specific gravity of forage particles in the rumen. **J. Dairy Sci.**, v. 74, p. 3872–3883.
- WILSON, J.R. Organization of forage plant tissues. In: JUNG, H.G.; BUXTON, D.R.; HATFIELD, R.D. et al. (Eds.) **Forage cell wall structure and digestibility**. Madison: American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., 1993, p.1-32.