



Modelagem matemática do balanço de gases do efeito estufa na pecuária de corte

Luís Gustavo Barioni¹, Tiago Zanett Albertini², Sergio Raposo de Medeiros³

¹ Pesquisador do Laboratório de Matemática Computacional da Embrapa Informática Agropecuária.

² Pós-doutorando da Embrapa.

³ Pesquisador da Embrapa Gado de Corte.

RESUMO - Modelos matemáticos são indispensáveis na geração de estimativas do balanço de gases de efeito estufa e na avaliação de estratégias de mitigação e adaptação em função de: (a) não haver tecnologia que permita medição direta dos fluxos de gases de efeito estufa nas escalas de interesse; (b) ser necessária a avaliação de grande número de cenários alternativos, tornando inviável sua avaliação por meio de experimentos de campo; (c) o horizonte temporal de interesse ser muito longo (usualmente na escala de décadas); e (d) haver interesse em se otimizar o sistema produtivo considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais. Neste trabalho, discute-se o uso de modelos em três tipos fundamentais de análise: (a) inventários de emissões e remoções de gases de efeito estufa; (b) determinação da pegada de carbono; e (c) avaliação de estratégias de mitigação e/ou adaptação. Apresentam-se, ainda, os principais modelos relacionados aos processos de emissão e remoção de gases de efeito estufa (fermentação entérica, balanço de carbono no solo, emissões por dejetos) e de sistemas produtivos, incluindo os relacionados à avaliação de ciclo de vida. Por fim, com base no desenvolvimento atual e nos projetos de pesquisa existentes, faz-se um balanço e algumas projeções para o desenvolvimento de algumas linhas de pesquisa no futuro para essa área no Brasil.

Palavras-chave: avaliação de ciclo de vida, Brasil, emissões, escala, modelagem, sistemas produtivos

Mathematical modeling of greenhouse gases flows in beef cattle production

ABSTRACT - Mathematical models are needed to generate estimates of the balance of greenhouse gases and evaluation of strategies of mitigation and adaptation because: (a) there is no technology that allows direct measurement of greenhouse gases flows in the scales of interest (i.e. farms, countries or the planet); (b) it is necessary to evaluate a large number of alternative scenarios, making unviable their evaluation through field experiments, (c) the time horizon of interest is very long (often in the range of decades for mitigation and adaptation studies), (d) due to the interest in optimizing the production system considering economic, social and environmental criteria. This paper discusses the use of models in three basic types of analysis: (a) inventorying emissions and removals of greenhouse gases; (b) determining the carbon footprint, and (c) assessing mitigation and adaptation strategies. Key models used to estimate the emission and removal of greenhouse gases at the process level (i.e. enteric fermentation, soil carbon dynamics, and waste emissions) and production systems, including whole farm systems and lifecycle assessment are also presented. Finally, based on the current development and existing research projects, projections related the development of modeling in Brazil for the near future are discussed.

Key Words: Brazil, emissions, lifecycle assessment, modelling, whole farm systems, upscaling

Introdução

A preocupação com os impactos do aquecimento global tem gerado demanda por ações para reduzir sua magnitude (mitigação) ou minimizar seus impactos negativos (adaptação).

A agropecuária é um dos setores sob holofotes, uma vez que seu grande potencial de contribuição para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem sido reconhecido (Golub et al., 2009; Eckard et al., 2010; Kaparaju & Rintala, 2011), bem como seu papel em assegurar segurança

alimentar para a crescente população mundial (FAO, 2011) e permitir desenvolvimento e bem-estar para a população no campo (McDermott et al., 2010). O avanço na definição de estratégias de mitigação e adaptação na produção de bovinos de corte requer estimativa cada vez mais confiável do balanço de GEE em níveis de agregação que vão desde a unidade rural até a escala planetária (Wagner-Riddle et al., 2008). Modelos matemáticos são indispensáveis na geração de estimativas do balanço de GEE e na avaliação de estratégias de mitigação e adaptação em função de: (a) ainda não existir tecnologia que permita medição direta dos

fluxos de GEE no nível de agregação desejado (sistema produtivo, região ou país); (b) ser necessária a avaliação de grande número de cenários alternativos, muitas vezes inviável de serem estudados em experimentos de campo; (c) o horizonte temporal de interesse normalmente pode inviabilizar medições diretas, uma vez que mudanças climáticas e no balanço de GEE ocorrem em períodos longos (usualmente na escala de décadas); (d) eventualmente existir interesse em se otimizar o sistema produtivo considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar conceitos básicos e uma visão geral sobre a modelagem para estimação do balanço de gases do efeito estufa na pecuária de corte com uma visão das possíveis linhas para desenvolvimento futuro.

Contexto histórico

Evidências cada vez mais conclusivas sobre as mudanças climáticas globais têm gerado reações cada vez mais intensas da comunidade científica, da sociedade e dos governantes. Nas últimas duas décadas, houve grande número de importantes eventos com enfoque nas mudanças

climáticas globais, nos quais o Brasil tem assumido papel de destaque. A assinatura da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), por aproximadamente 150 países, ocorreu no Rio de Janeiro em 1992, quatro anos após a criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC foi criado frente ao reconhecimento da contribuição antropogênica sobre as mudanças climáticas (IPCC, 2011), ao passo que na UNFCCC exigiu-se que os países participantes desenvolvessem, atualizassem periodicamente e publicassem inventários nacionais de emissão de GEE usando metodologias padronizadas (UNFCCC, 2011a; Figura 1).

Um ano após a publicação dos *guidelines* do IPCC (recomendações para padronização dos inventários nacionais), em 1997, foi assinado o Protocolo de Kyoto com o compromisso de 37 países industrializados em reduzir suas emissões (UNFCCC, 2011b). Em 2006, foi publicado o Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de GEE da pecuária, com estimativas das emissões de CH₄ entérico e dos dejetos de animais da produção pecuária, com base nas diretrizes do IPCC (MCT, 2011a).

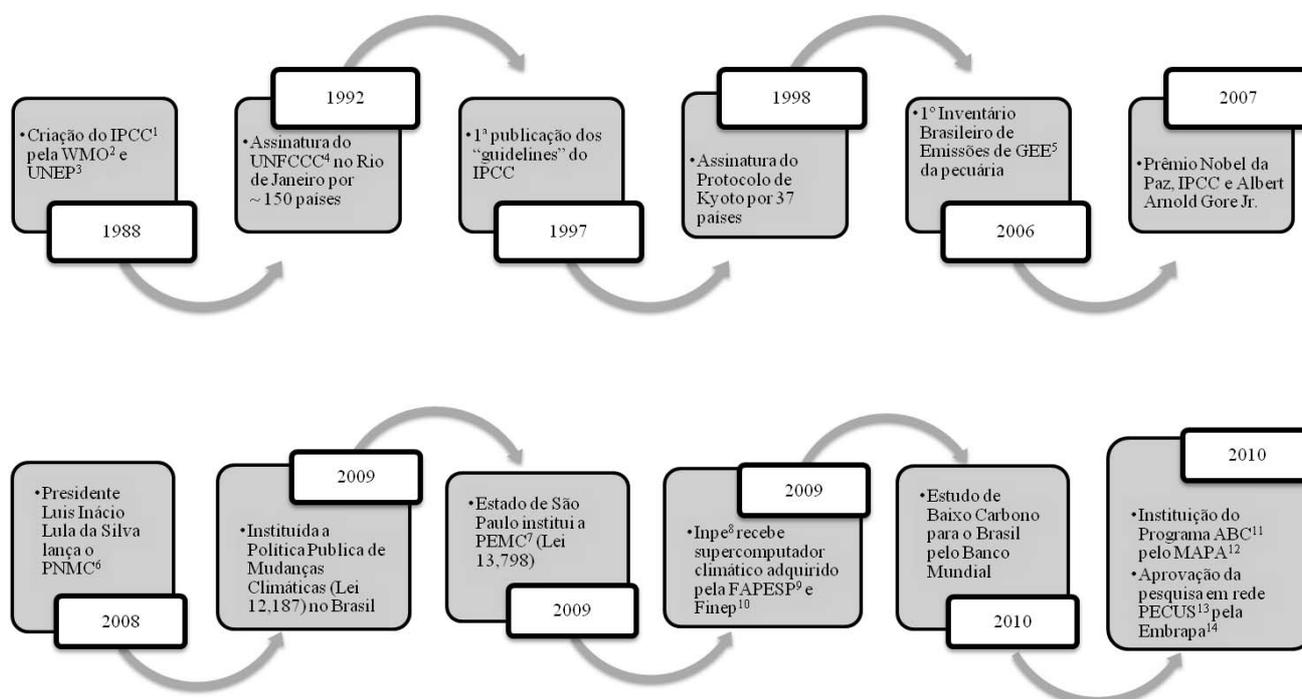


Figura 1 - Evolução histórica de eventos político-ambientais relacionados às emissões de gases do efeito estufa na agricultura no Brasil e no Mundo. ¹Intergovernmental Panel on Climate Change; ²World Meteorological Organization; ³United Nations Environment Programme; ⁴United Nations Framework Convention on Climate Change; ⁵Gases de efeito estufa; ⁶Plano Nacional sobre Mudança do Clima; ⁷Política Estadual de Mudanças Climáticas; ⁸Instituto Nacional de Pesquisas Climáticas; ⁹Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo; ¹⁰Financiadora de Estudos e Projetos; ¹¹Programa Agricultura de Baixo Carbono; ¹²Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; ¹³Dinâmica de gases de efeito estufa em sistemas de produção da agropecuária brasileira; e ¹⁴Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

Em 2008, foi lançado o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), baseado no trabalho realizado pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima. O PNMC determina redução de 70% no desmatamento até 2017. Em 2009, o Parlamento Brasileiro aprovou a Lei 12.187, que institui a Política Nacional de Mudanças Climáticas do Brasil (MCT, 2011b). Neste mesmo ano, foi instituída a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) do Estado de São Paulo pela Lei 13.798, que possui a meta de redução em todos os setores, de 20% das emissões de GEE até 2020, tendo por base o ano de 2005 (SMA, 2011). Ainda em 2009, o Instituto Nacional de Pesquisas Climáticas (Inpe) investiu cerca de R\$ 50 milhões em um super computador para simulação de modelos climáticos, fomentados pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (Finep; Agência FAPESP, 2011).

A agropecuária, apesar de seu enorme desafio em atender um aumento de 70% na demanda de alimentos para 2050 (FAO, 2009) e o dobro de consumo de carne do atual (FAO, 2006, 2009), pode dar contribuições expressivas para mitigação (World Bank, 2011). Estes fatos contribuíram para que, em 2010, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) instituisse o Programa Agricultura de Baixo Carbono (Programa ABC), que tem o objetivo de financiar a produção de alimentos e bioenergia com redução de GEE. As ações do Programa ABC estão inseridas no Plano Agrícola e Pecuário 2010/2011 e prevêem investimentos totais na ordem de R\$ 2 bilhões. Também em 2010, foi aprovado um projeto de pesquisa em rede liderado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), intitulado Dinâmica de Gases de Efeito Estufa em Sistemas de Produção da Agropecuária Brasileira (PECUS), com um orçamento previsto de R\$ 8 milhões (CPPSE, 2011). Recentemente, o Banco Mundial elaborou um Estudo de Baixo Carbono para o Brasil, no qual se conclui que o potencial de mitigação das emissões do país está fortemente associado às mudanças de uso da terra e mudanças tecnológicas na agricultura, com destaque para o desmatamento e bovinocultura (World Bank, 2011).

Conceitos básicos de modelagem matemática

Um modelo matemático é constituído de uma ou mais equações (ou inequações), com a finalidade de representar o comportamento de sistemas ou fenômenos naturais. Eles são considerados indispensáveis, atualmente, para expressão do conhecimento científico, possibilitando novas descobertas, contestação de dogmas e o desenvolvimento de sistemas para apoio à tomada de decisões (Tedeschi, 2006). A formulação de modelos que incorporem a

complexidade da realidade e se prestem genericamente à reprodução do comportamento do sistema natural é impraticável. Assim, modelos matemáticos incorporaram apenas aspectos essenciais do sistema em função de um objetivo definido. Além disso, o desenvolvimento de modelos e sua capacidade preditiva são limitados pela disponibilidade de dados para sua parametrização, validação ou aplicação (i.e. dados de entrada disponíveis).

Modelos matemáticos permitem avaliar o comportamento de um sistema de modo a permitir a compreensão das respostas a estímulos externos, projeções futuras, riscos e situações atípicas. Além disso, permitem auxiliar na análise de decisões ou intervenções, por possibilitarem a identificação de estratégias de ação mais promissoras por meio de técnicas de análises de sensibilidade, avaliação de cenários e otimização.

O processo de modelagem inclui diversos passos, que se iniciam pelo estabelecimento dos objetivos e delimitação do escopo do modelo e passam pela escolha de formas matemáticas de representação e pela escolha de conjuntos de dados apropriados para sua parametrização.

Uma vez que soluções analíticas são possíveis em apenas pequena parte dos problemas existentes no mundo real, grande parte dos modelos é resolvida utilizando-se métodos numéricos, particularmente a simulação.

Estimativas obtidas por medições diretas com metodologia adequada são obviamente mais confiáveis que aquelas provenientes de modelos matemáticos. Isso porque são a referência para a parametrização (ajuste) e a avaliação dos modelos. Entretanto, modelos matemáticos podem potencializar o uso das informações obtidas experimentalmente e ampliar sua abrangência a um custo mais baixo e tempo mais curto que a experimentação.

Modelos matemáticos podem ser desenvolvidos por meio de duas abordagens básicas:

1) na observação direta de variáveis de interesse associadas ao comportamento do sistema. Análises estatísticas a partir dessas observações podem, então, evidenciar as relações entre elas de forma que a partir da determinação de valores de algumas delas (preditoras) pode-se estimar o valor de outra variável de interesse (resposta). Nesse caso, não é explicitado nenhum mecanismo causal pelo qual uma variável interfere na resposta do sistema. Modelos desenvolvidos a partir dessa abordagem são denominados empíricos.

2) abordagem em que os processos internos que interagem de modo a gerar o comportamento do sistema possam ser explicitados. Nela, o sistema é decomposto em seus principais componentes e fluxos internos a partir do conhecimento sobre seu funcionamento. Os fluxos e

interações entre os processos são modelados individualmente, inclusive empiricamente. Os resultados desses modelos são produzidos a partir da simulação dos processos e na interação entre eles. Os modelos resultantes dessa abordagem são denominados mecanicistas ou baseados em processos.

A hierarquia organizacional de modelos mecanicistas relacionados ao balanço de GEE na pecuária pode ser representada didaticamente como: modelo de processos com fluxo de gases (rúmen, gleba homogênea) >animal>estabelecimento rural>região >nação>planeta.

Em modelos com estrutura elaborada, é importante que os conceitos empregados estejam consolidados e sejam suficientemente genéricos e aplicáveis à análise em questão de modo a minimizar, o que é frequentemente denominado “erro de estrutura” do modelo. Além disso, é necessário julgar, no desenvolvimento do modelo, se os dados necessários para determinação acurada do valor de maior conjunto de parâmetros estão disponíveis, pois, em muitos casos, os erros associados à determinação do maior número de parâmetros (em razão da escassez de dados ou suas limitações estatísticas) podem não compensar o maior realismo do modelo. A maior dificuldade na compreensão e análise matemática deve ser considerada como desvantagem dos modelos mais complicados. De fato, um modelo deve ser tão simples quanto possível, desde que represente adequadamente o comportamento da resposta estudada.

Na aplicação de modelos para estimação quantitativa das respostas de um sistema, é necessário também considerar se os conceitos e o valor do conjunto de parâmetros utilizados são aplicáveis para o objetivo da análise. Também, na escassez de dados de entrada confiáveis para gerar estimativas, a aplicação de modelos de estrutura mais simples e com menor número de variáveis e parâmetros podem ser mais adequados, uma vez que erros associados às variáveis preditoras (dados de entrada) podem superar aqueles relacionados à estrutura do modelo. No âmbito da modelagem dos fluxos de GEE isso é implicitamente reconhecido pelo IPCC (2006b) para a elaboração dos inventários nacionais de emissões, que propõe um sistema com três níveis de complexidade dos modelos (conhecidos como nível ou “tier” 1, 2 e 3). Sistemas com modelos de mais de um nível de complexidade são comuns também em outras aplicações na produção animal (e.g. NRC, 2000).

Análises suportadas por modelos de fluxos de gases

Uma vez que o desenvolvimento e uso dos modelos matemáticos devem ser direcionados pelos objetivos das análises a serem realizadas, é importante considerar quais os tipos de análises mais frequentemente realizados.

Basicamente, as principais aplicações de modelos relacionados à bovinocultura de corte e mudanças climáticas podem ser didaticamente classificadas em:

- Inventários de emissões e remoções de GEE
- Determinação da pegada de carbono
- Avaliação de estratégias de mitigação e/ou adaptação

Embora tenham em comum o fato de requererem modelos que estimem os fluxos em cada processo, normalmente incluindo fermentação entérica [metano (CH_4)], produção e manejo do esterco e urina [CH_4 e óxido nitroso (N_2O)], aplicação de corretivos e fertilizantes [N_2O e dióxido de carbono (CO_2)] e dinâmicas dos estoques de carbono no solo e na biomassa (IPCC, 2006a), as aplicações possuem importantes peculiaridades.

No caso dos inventários de emissões e remoções, a escala de interesse é normalmente região, nação ou planeta. O objetivo é contabilizar todo o balanço de gases para evidenciar, ao longo do tempo, trajetórias de aumento ou redução das emissões líquidas. A contabilidade dos fluxos é usualmente feita para cada setor da economia. Porém, as estatísticas reportadas em inventários não são adequadas para associar emissões a produtos. Isso porque vários setores são necessários para a produção e comercialização de um produto. Por exemplo, na produção de carne, fertilizantes, energia, transporte podem, entre outros, ser necessários. Também, a mitigação das emissões geradas por seus produtos (e.g. sebo para a produção de biocombustível) não é computada no setor, de forma a evitar dupla contagem na contabilidade regional.

Geralmente inventários nacionais fazem uso de modelos empíricos simples, uma vez que faltam dados regionais, nacionais ou globais exigidos para análises o uso de modelos mais complexos. O IPCC encoraja o uso de modelos mais elaborados e calibrados regionalmente, desde que sejam cientificamente aceitos (IPCC, 2006a).

Na determinação da pegada de carbono, o objetivo é quantificar as emissões associadas a um produto em determinado no nível de sistema de produção, de forma a possibilitar comparações entre sistemas e locais de produção alternativos. A pegada de carbono é determinada pela técnica de avaliação de ciclo de vida (Crosson et al., 2011), que se baseia em determinação dos insumos utilizados na produção, bem como nos fluxos de gases durante o processo produtivo e depois da produção até seu consumo. (Peters et al., 2010).

Estudos de avaliação de estratégias de mitigação e adaptação normalmente ocorrem nas escalas nas quais as intervenções podem ser realizadas (normalmente sistema de produção, região ou país). Esses tipos de estudos, via de regra, incluem avaliação econômica, por ser necessário para

tomada de decisões. Eles demandam os modelos mais elaborados, pois devem considerar os processos em detalhe, as interações decorrentes de cenários de intervenção, suas consequências econômicas e externalidades. Modelos de sistemas de produção (no caso da atividade isolada) ou de mudança de uso da terra são os mais utilizados.

Modelos de processos

As medidas diretas de fluxo são possíveis, normalmente, com relação a processos isolados e em pequena escala. Estudando-se os processos individualmente, os fatores que afetam os fluxos de GEE são também mais bem compreendidos. Assim, a abordagem básica tem sido modelar os processos relevantes para, depois, integrá-los de forma adequada para a avaliação do sistema produtivo, da região, do país ou do mundo.

Diversos modelos empíricos, obtidos por regressões lineares simples ou múltiplas (Ellis et al., 2006) ou pela aplicação de modelos mecanicistas da fermentação ruminal (Dijkstra et al., 1992; 2008; Mills et al., 2001; Bannink et al., 2005, 2006, 2008), estão disponíveis para estimação das emissões entéricas de metano. Considerando o funcionamento do rúmen, o modelo mecanicista é capaz de abordar a mitigação por vários fatores relacionados à metanogênese (Bannink et al., 2005) com escopo muito mais abrangente do que a abordagem empírica. Modelos mecanicistas são utilizados no inventário nacional de emissões holandesas desde 2005 (Van Der Maas et al., 2009).

As emissões de N_2O (relacionadas ao N) podem ser estimadas a partir do cálculo da excreção de N. A excreção pode ser estimada simplesmente como a diferença entre o consumo de N e a sua retenção em tecidos corporais, a qual pode ser estimada de acordo com um modelo de crescimento animal (e.g. Garcia et al., 2008). Por exemplo, um animal de 300 kg consumindo 7 kg de matéria seca/dia contendo 10% de proteína bruta consome 0,112 kg N/dia. Se este animal estiver ganhando 0,9 kg/dia, com ganho contendo 20% de proteína, a retenção seria de 0,029 kg N/dia, ou seja, este animal estaria excretando 0,083 kg N/dia.

Parte deste N na excreta é convertida para N_2O , sendo variável em função do sistema de manejo do esterco e das condições ambientais. Em sistemas de manejo de esterco líquido (em lagoas, por exemplo), a fermentação é anaeróbica e há produção significativa de CH_4 e de N_2O , que aumentam em função da temperatura ambiental. Já no sistema de manejo sólido, ou com a deposição direta pelo animal na pastagem, ocorre degradação aeróbica, com produção muito menor desses gases. Loyon et al. (2008) estimam que entre 0,1 e 0,3% do N do esterco é convertido em N_2O em sistemas

de manejo sólido. Outra fonte importante de emissão de N_2O é o fertilizante nitrogenado. Essa emissão pode ser estimada por meio de valores “default” do IPCC ou por modelos mecanicistas, tais como o PASIM (Riedo et al., 1998; Vuichard et al., 2007a,b) e o DNDC (Li et al., 1994), que representam o estado da arte na representação desse processo.

A pastagem pode ser um importante dreno de carbono (na forma de CO_2), minimizando, anulando ou invertendo o fluxo líquido de gases de efeito estufa no sistema produtivo (Neely et al., 2009). O modelo CENTURY (Parton et al., 1987) tem sido um dos mais utilizados para quantificar a dinâmica de C, além de outros nutrientes (N, P e S). A sua adoção como padrão foi proposta pelo TSBF - Tropical Soil Biology and Fertility Programme, da International Union of Biological Science - IUBS/UNESCO (Anderson & Ingram, 1993). Baseia-se na divisão da matéria orgânica do solo (MOS) em compartimentos funcionais (diferentes tempos de residência e suas razões C: nutrientes minerais) e na produção primária, a qual pode ser definida pelo usuário (Parton et al., 1994).

Estudos com o modelo CENTURY no Brasil são recentes. O modelo já foi utilizado com relativo sucesso em estudos no Rio Grande do Sul, envolvendo sistemas agrícolas (Debarba, 2002; Fernandes, 2002; Bortolon et al., 2009); estudos com a cultura da cana-de-açúcar em São Paulo (Silveira et al., 2000; Tonrquist et al., 2009) e estudos em Minas Gerais, também em sistemas agrícolas (Leite et al., 2004, 2005). Na região Amazônica o modelo CENTURY foi utilizado por Cerri et al. (2004).

Uma das maiores críticas aos simuladores atuais relaciona-se a sua estrutura (Arah & Gaunt, 2001; Gaunt et al., 2001). Os compartimentos de carbono são definidos empiricamente, constituindo reservatórios conceituais (Falloon & Smith, 2000; Paustian, 2001; Arah & Gaunt, 2001). O tamanho destes reservatórios é estimado a partir do ajuste aos estoques totais observados, durante o processo de calibração do modelo, não sendo possível a sua medição direta (Magid et al., 1995; Elliott et al., 1996; Christensen, 1996, 2000; Arah & Gaunt, 2001; Gaunt et al., 2001). Resultados promissores vêm sendo obtidos na tentativa de se relacionarem os reservatórios conceituais às frações da MOS separadas por processos físicos (Balesdent, 1996). Entretanto, alguns autores acreditam que os simuladores atuais deveriam passar por profundas modificações para que fossem incluídos somente reservatórios mensuráveis em suas rotinas (Magid et al., 1995; Elliott et al., 1996; Christensen, 1996, 2000; Gaunt et al., 2001).

Modelos de avaliação de sistemas de produção

Modelos na escala do sistema de produção podem ser categorizados como modelos de unidade produtiva (Whole Farm Systems, WFS) ou de ciclo de vida (Life Cycle Assessment, LCA). Ambos têm sido amplamente utilizados recentemente. Na atual revisão 26% e 37% das publicações (que são apresentadas no próximo tópico) estruturaram seus modelos baseados em WFS e LCA, respectivamente. Segundo Crosson et al. (2011), a vantagem dos modelos de análise de sistemas sobre as metodologias recomendadas pelo IPCC reside no fato de apresentarem uma resolução mais detalhada dos processos que ocorrem dentro da fazenda e, dessa forma, serem mais apropriados para avaliação de estratégias de mitigação e adaptação. Embora tanto WFS quanto LCA relacionem-se à unidade produtiva, estudos de LCA têm uma abordagem geralmente mais associada à contabilidade de emissões, para fins de comparação de eficiência com outros sistemas, raramente sendo utilizados para estudos de mitigação. Para isso, LCA

deve seguir normas ISO (International Organization for Standardization, ISO 14040-14044). Por outro lado, WFS utilizam maior detalhamento do sistema de forma a permitir a análise de intervenções sobre o próprio sistema produtivo, com a finalidade de, na maior parte das vezes, comparar diferentes estratégias ou de evidenciar estratégias otimizadas. É esperado, no entanto, certa convergência entre as essas abordagens. Como exemplo, o modelo Holo permite ao produtor avaliar as consequências de suas estratégias com base em LCA (e.g. Beauchemin et al., 2010).

O desenvolvimento de modelos de análise de sistemas segue quatro fases, que resumidamente são: 1) especificação conceitual: os objetivos (quantificação e/ou mitigação), o conceito/sistema modal (e.g. pecuária ou integrado) e suas fronteiras (e.g. GEE emitidos até a comercialização da carne) são especificados (Figura 2); 2) desenvolvimento do modelo: os modelos matemáticos são definidos e integrados para quantificar as emissões das fontes; 3) aplicação do modelo: dados coletados na fazenda,

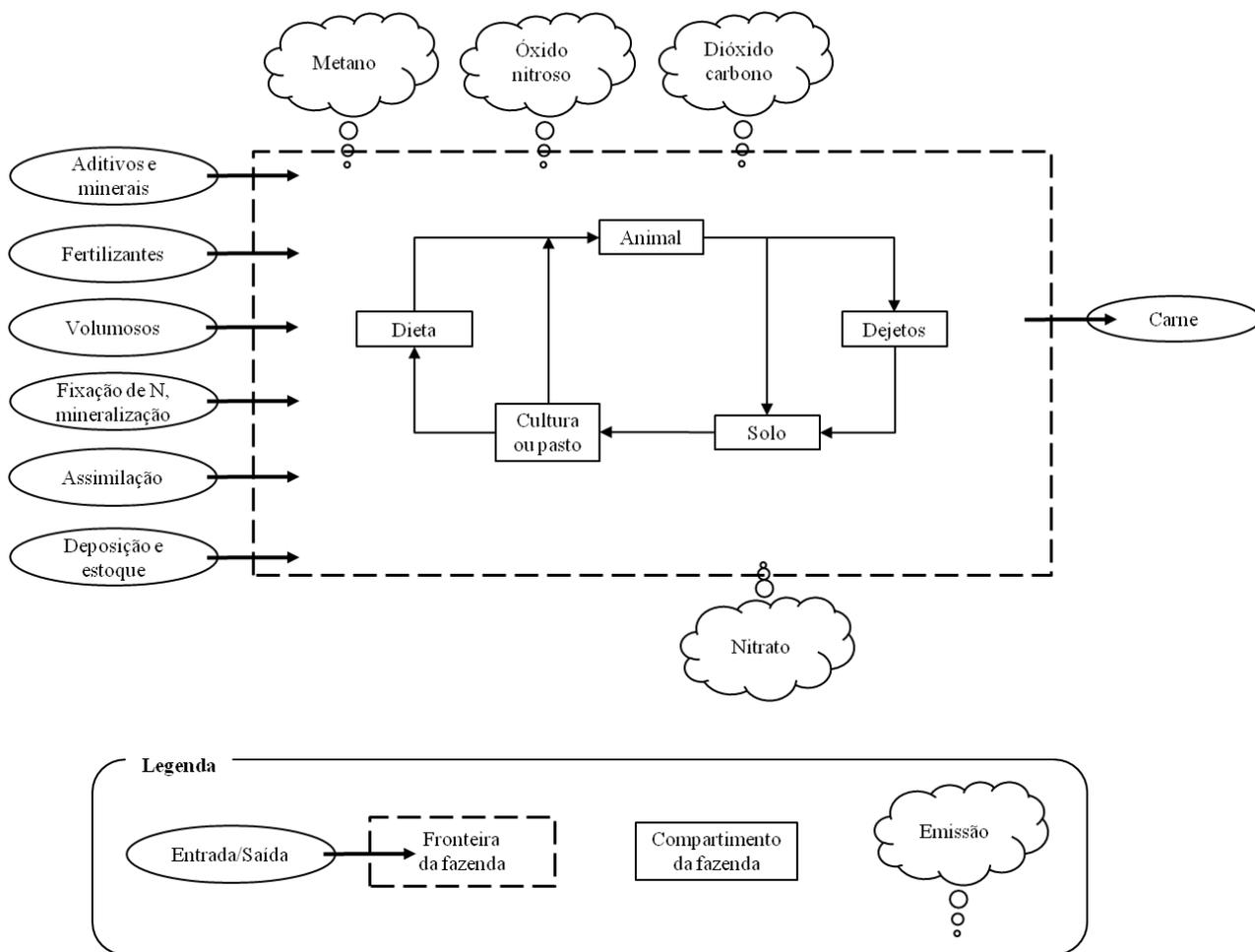


Figura 2 - Diagrama simplificado dos componentes utilizados na especificação dos modelos de análise de sistemas na pecuária de corte. Adaptado de Phetteplace et al. (2001), Schils et al. (2005) e Beauchemin et al. (2010).

estatísticas regionais, econômicas e/ou Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são utilizados (e.g. Neufeldt et al., 2006) e 4) interpretação dos resultados: conclusões e recomendações são inferidas para o sistema de produção. Análises de sensibilidade ou incerteza podem ser conduzidas (e.g. comparando a variabilidade do modelo proposto com padrões do IPCC).

Modelos na literatura

Buscou-se por meio da revisão contemplar modelos matemáticos com uma abordagem integrada do sistema de produção quanto aos processos relacionados às emissões de GEE. O estímulo à modelagem para quantificação dos fluxos de gases na bovinocultura pode ser traduzido pelo aumento do número de publicações ao longo do tempo (Figura 3).

Com o avanço dos métodos matemáticos (modelagem dinâmica e métodos de otimização), estatísticos (“linear e non-linear mixed models” e “structural equation modeling”), a integração de modelos a sistemas de informação geográfica, o aumento da quantidade de dados organizados disponíveis e maior poder computacional, modelos matemáticos têm possibilitado análises cada vez mais poderosas e confiáveis.

A Tabela 1 apresenta uma listagem de referências de artigos relacionados à emissão de GEE na pecuária, organizados por periódico. A Figura 4 apresenta a distribuição desses artigos por país do primeiro autor.

Limitações metodológicas e alternativas

Uma temática que merece destaque se baseia nos riscos ou limitações metodológicas dos modelos estatísticos ou empíricos, a saber: i) as emissões resultantes não podem ser extrapoladas para condições ambientais diferentes das quais os animais foram avaliados; ii) assumem uma relação entre causa e efeito entre as variáveis, quando na verdade elas podem não existir e iii) a ausência de determinadas variáveis nutricionais podem reduzir a capacidade preditiva do modelo. Por outro lado, as limitações dos modelos dinâmicos são: i) a necessidade de um grande conjunto de dados relativos às variáveis preditoras para estimação das emissões; ii) podem requerer dados regionais não disponíveis para parametrização ou avaliação.

As limitações abordadas são consideradas pelos modeladores na estruturação, melhoria e evolução dos sistemas. É válido destacar que modelos estatísticos predominam na modelagem de sistemas na escala de fazenda ou superior (i.e. região, nação etc). Todas as publicações revisadas no atual estudo, que incluem a metanogênese ($n = 36$), estimam as emissões de CH_4 dos animais com modelos estatísticos. Além disso, os modelos revisados estimam suas emissões principalmente utilizando o método “Tier2” do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006b).

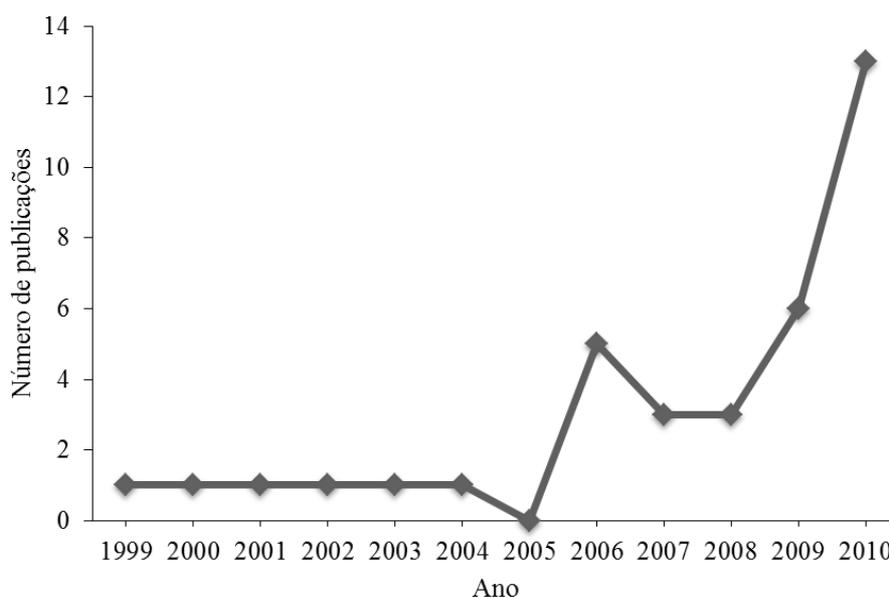


Figura 3 - Evolução histórica das publicações que abordam sobre modelos matemáticos na estimativa de emissões e remoção de gases do efeito estufa na pecuária de corte até o ano de 2010.

Tabela 1 - Periódicos e outras publicações consultadas que abordam modelos matemáticos na predição de gases do efeito estufa na pecuária de corte

Fonte consultada	Referência
Agricultural Systems	Kulshreshtha et al. (2000); Casey & Holden (2006b); Vergé et al. (2008); Glendining et al. (2009); Beauchemin et al. (2010); Pelletier et al. (2010); Veysset et al. (2010); White et al. (2010)
Agriculture, Ecosystems & Environment	Neufeldt et al. (2006); Gibbons et al. (2006); Hutchings et al. (2007); Neufeldt & Schafër (2008)
Greenhouse Gases and Animal Agriculture Conference	Bateman et al. (2010); Beauchemin et al. (2010); Browne et al. (2010); Wheeler et al. (2010)
Animal Feed Science and Technology	Browne et al. (2011); Sheppard & Bittman (2011)
Scientia Agricola	Cerri et al. (2009, 2010)
Universidade de São Paulo - ESALQ ¹	Monteiro (2009); Albertini (2010)
Animal Production Science	Sise et al. (2010)
Animal Science Journal	Ogino et al. (2007)
Defra ² e Cranfield University	Williams et al. (2006)
Ecological Economics	Subak (1999)
Environmental Modeling and Assessment	Hyman et al. (2002)
Environmental Pollution	Dalgaard et al. (2011)
Environmental Science & Technology	Peters et al. (2010)
Journal of Animal Science	Ogino et al. (2004)
Journal of Cleaner Production	Nguyen et al. (2010)
Journal of Environmental Quality	Casey & Holden (2006a)
Livestock Science	Béline et al. (2007)
Nutrient Cycling in Agroecosystems	Phetteplace et al. (2001)
Organic Agriculture	Veysset et al. (2011)
Renewable Agriculture and Food Systems	Küstermann et al. (2008)
The International Journal of Life Cycle Assessment	Cederberg & Stadig (2003)
The Journal of Agricultural Science	Edwards-Jones et al. (2009); Stewart et al. (2009)

O encorajamento do IPCC para países que detém rebanhos comerciais importantes para a melhoria da acurácia e da precisão de suas estimativas é notório. Neste caso, o desenvolvimento fatores de conversão (i.e. conversão de energia bruta da dieta em CH₄, ou Y_m) próprios para as categorias de interesse, assim como o desenvolvimento de

modelos mais sofisticados, é fundamental. Neste contexto, modelos mecanicistas dinâmicos apresentam consideráveis vantagens, uma vez que tendem a apresentar menor viés e maior sensibilidade na detecção dos efeitos resultantes de métodos de mitigação quando comparados a modelos empíricos (Kebreab et al., 2008).

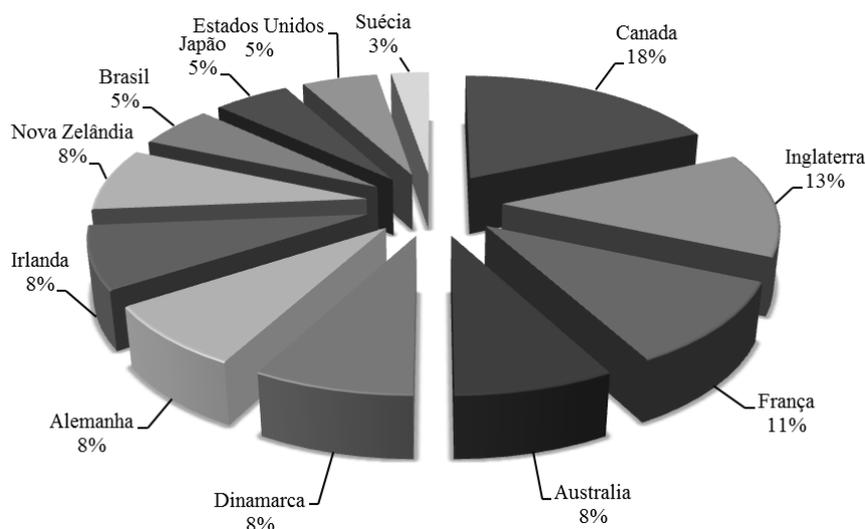


Figura 4 - Proporção (%) por país de trabalhos do primeiro autor sobre modelagem matemática dos fluxos de gases do efeito estufa na pecuária de corte publicados em periódicos indexados.

O CH_4 e N_2O emitidos a partir das fezes e urina de bovinos manejados sobre pastagens ou confinamento devem ser computados nos modelos. Contudo, a estimativa da emissão dos GEE proveniente dos dejetos de bovinos é complexa, devido à variabilidade decorrente de fatores como condições climáticas, microbiológicas do ambiente, dieta e manejo (Kebreab et al., 2006). Assim, a metodologia “Tier2” do IPCC (2006b) tem sido amplamente utilizada na predição dos fatores de conversão do CH_4 e N_2O provenientes dos sólidos voláteis dos dejetos. De acordo com Wagner-Riddle et al. (2008), a desvantagem dessa abordagem é que práticas de mitigação podem não ser detectadas pelas equações do IPCC (e.g. mudanças na dieta do animal e por conseguinte no conteúdo de sólidos voláteis podem não afetar as emissões de CH_4). Consequentemente, ajustes na avaliação do fluxo de GEE e dos fatores de conversão a partir dos dejetos e de seu manejo (principalmente para bovinos confinados), bem como a modelagem dinâmica para as condições brasileiras, são fundamental e prioritário.

Perspectivas para o Futuro

As tendências atuais em termos de número de publicações, o direcionamento de recursos para pesquisa, a demanda governamental e a geração de volume crescente de dados organizados sobre os fluxos de gases de efeito estufa levam a crer que a modelagem matemática para quantificação do balanço de gases de efeito estufa e apoio à política pública será uma área em intenso desenvolvimento no futuro próximo.

O Brasil ainda apresenta carência de trabalhos consolidados no que tange o desenvolvimento de modelos matemáticos de processos e sistemas produtivos para balanço de gases de efeito estufa. No entanto, vários grupos nacionais têm avançado consistentemente no sentido de avaliar fatores de emissão baseados em dados nacionais, avaliar e reparametrizar modelos de processos desenvolvidos no exterior com bases de dados nacionais. Além disso, tem-se recentemente evoluído no sentido de produzir modelos integrados para projeção e avaliação de cenários no nível nacional.

Com incentivos adequados, a pesquisa brasileira tem a perspectiva de, nos próximos cinco anos, produzir modelos biofísicos e econômicos dinâmicos do balanço de gases de efeito estufa em sistemas de produção de bovinos de corte adequados à pecuária de corte nacional e internacionalmente reconhecidos. Verifica-se também a oportunidade de ganhos significativos na capacidade analítica e apoio à tomada de decisões pela aplicação de técnicas mais sofisticadas de análise estatística (e.g. structural equation modelling), simulação estocástica, avaliação de risco e otimização multicritério. Ademais, a integração de modelos matemáticos dinâmicos em métodos de avaliação de ciclo de vida na pecuária brasileira deverá ser possível ainda nessa década.

Existe demanda também para a construção de plataformas integradas que permitam o *upscaling* de modelos de processos biológicos e de avaliação econômica em plataformas integradas que permitam análises regionais e a avaliação de políticas públicas de forma mais detalhada e cientificamente embasada. Para

que isso ocorra, entretanto, uma condição *sine qua non* é a construção de bancos de dados geográficos das condições biofísicas, uso da terra, preços e infra-estrutura. Embora as condições tecnológicas existam no País, o tempo necessário para a construção dessas ferramentas é incerto, uma vez que depende de grande mobilização de recursos humanos e capital.

Referências

- ALBERTINI, T.Z. **Efeito do peso adulto e produção de leite de vacas de corte sobre a eficiência energética-ambiental-econômica do sistema de cria**. 2010. 97f. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: www.teses.usp.br.
- ARAH, J.R.M.; GAUNT, J.L. Questionable assumptions in current soil organic matter transformation models. In: REES, R.M.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A. (Eds.) **Sustainable management of soil organic matter**. Wallingford: CAB International, 2001. p.83-89.
- BALESDENT, J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modeling in some cultivated soils. **European Journal of Soil Science**, v.47, p.485-493, 1996.
- BANNINK, A.; VAN LEEUWEN, P.; HAMMINGA, A. et al. The effect of feeding strategy after parturition on the development of rumen epithelium in dairy cows. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE EUROPEAN SOCIETY OF VETERINARY & COMPARATIVE NUTRITION, 9., 2005, Grugliasco, Turin, Italy. **Proceedings...** Grugliasco: 2005. (CD-ROM).
- BANNINK, A.; DIJKSTRA, J.; KEBREAB, E. et al. Advantages of a dynamical approach to rumen function to help resolve environmental issues. In: KEBREAB, E.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. et al. (Eds.) **Modelling nutrient utilization in farm animals**. Wallingford: CAB International, 2006. p.281-298.
- BANNINK, A.; FRANCE, J.; LÓPEZ, S. et al. Modelling the implications of feeding strategy on rumen fermentation and functioning of the rumen wall. **Animal Feed Science and Technology**, v.143, n.1, p.3-26, 2008.
- BATEMAN, H.G.; ALDRICH, J.M.; FOKKINK, W.B. et al. Accuracy and precision of empirical models for predicting enteric methane production by cattle and sensitivity of a proprietary model to dietary nutrient change. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2010, Banff, Canada. **Anais...** Banff, 2010. (CD-ROM).
- BEAUCHEMIN, K.; JANZEN, H.H.; LITTLE, S. et al. Mitigation of greenhouse gas emissions from beef production in Canada – Life cycle analysis using Holos. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2010, Banff, Canada. **Anais...** Banff, 2010. (CD-ROM).
- BEAUCHEMIN, K.A.; JANZEN, H.H.; LITTLE, S.M. et al. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: a case study. **Agricultural Systems**, v.103, p.371-379, 2010.
- BÉLINE, A.G.F.; BIOTEAU, T.; MAGUET, K. A French inventory of gaseous emissions (CH₄, N₂O, NH₃) from livestock manure management using a mass-flow approach. **Livestock Science**, v.112, p.252-260, 2007.
- BORTOLON, E.S.O.; MIELNICZUK, J.; TORQUIST, C.G. et al. Simulação da dinâmica do carbono e nitrogênio em um argissolo do Rio Grande do Sul usando modelo Century. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1635-1646, 2009.
- BROWNE, N.A.; ECKARD, R.J.; BEHRENDT, R. et al. A comparative analysis of greenhouse gas emissions from agricultural enterprises in southeastern Australia. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2010, Banff, Canada. **Anais...** Banff, 2010. (CD-ROM).
- BROWNE, N.A.; ECKARD, R.J.; BEHRENDT, R. et al. A comparative analysis of on-farm greenhouse gas emissions from agricultural enterprises in south eastern Australia. **Animal Feed Science and Technology**, doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.045, 2011.
- CASEY, J.W.; HOLDEN, N.M. Greenhouse gas emissions from conventional, agri-environmental scheme, and organic Irish suckler-beef units. **Journal of Environment Quality**, v.35, p.231-239, 2006.
- CASEY, J.W.; HOLDEN, N.M. Quantification of GHG emissions from suckler-beef production in Ireland. **Agricultural Systems**, v.90, p.79-98, 2006.
- CEDERBERG, C.; STADIG, M. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, n.6, p.350-356, 2003.
- CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.; BERNOUX, M. et al. Modeling changes in soil organic matter in Amazon forest to pasture conversion with the Century model. **Global Change Biology**, Oxford, v.10, p.815-832, 2004.
- CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; MAIA, S.M.F. et al. Greenhouse gas mitigation options in Brazil for land-use change, livestock and agriculture. **Scientia Agricola**, v.67, n.1, p.102-116, 2010.
- CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V. et al. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, v.66, n.6, p.831-843, 2009.
- CHRISTENSEN, B.T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pools in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: POWLSON, D.S.; SMITH, P.; SMITH, J.V. (Eds.) **Evaluation of soil organic matter models**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. p.143-159. (NATO ASI Series, 38).
- CHRISTENSEN, B.T. **Organic matter in soil: structure, function and turnover**. Tjele: DIAS Report, 30 - Plant Production, 2000. 95p.
- DALGAARD, T.; OLESEN, J.E.; PETERSEN, S.O. et al. Developments in greenhouse gas emissions and net energy use in Danish agriculture – How to achieve substantial CO₂ reductions? **Environmental Pollution**, doi:10.1016/j.envpol.2011.02.024, 2011.
- DIJKSTRA, J.; KEBREAB, E.; BANNINK, A. et al. Comparison of energy evaluation systems and a mechanistic model for milk production by dairy cattle offered fresh grass-based diets. **Animal Feed Science and Technology**, v.143, p.203-219, 2008.
- DIJKSTRA, J.; NEAL, H.D. St. C.; BEEVER, D.E. et al. Simulation of nutrient digestion, absorption and outflow in the rumen: model description. **Journal of Nutrition**, v.122, p.2239-2256, 1992.
- ECKARD, R.J.; GRAINGER, C.; KLEIN, C.A.M. Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. **Livestock Science**, v.130, p.47-56, 2010.
- EDWARDS-JONES, G.; PLASSMANN, K.; HARRIS, I. M. Carbon foot printing of lamb and beef production systems: insights from an empirical analysis of farms in Wales, UK. **Journal of Agricultural Science**, v.147, p.707-719, 2009.
- ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K.; FREY, S.D. Modeling the measurable or measuring the modelable: A hierarchical approach to isolating meaningful soil organic matter fractions. In: SMITH, J.U. (ED.) **Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. p.161-179.
- ELLIS, J.L.; KEBREAB, E.; ODONGO, N.E. et al. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. **Journal of Dairy Science** v. 90, p.3456-3467, 2006.
- ELLIS, J.L.; KEBREAB, E.; ODONGO, N.E. et al. Modeling methane production from beef cattle using linear and nonlinear approaches. **Journal of Animal Science**, v.87, p.1334-1345, 2009.

- FALLOON, P.; SMITH, P. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. **Soil Use and Management**, v.18, p.101-111, 2002.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **The state of Food and Agriculture 2010-2011**. Disponível em: <http://www.fao.org/publications/en/>. Acesso em: 11/5/2011.
- FERNANDES, F.F. **Uso do modelo Century no estudo da dinâmica do carbono orgânico em solos do Rio Grande do Sul**. 2002. 172f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- GARCIA, F.; SAINZ, R.D.; AGABRIEL, J. et al. Comparative analysis of two dynamic mechanistic models of beef cattle growth. **Animal Feed Science and Technology**, v.143, p.220-241, 2008.
- GAUNT, J.L.; SOHI, S.P.; YANG, H. et al. A procedure for isolating soil organic matter fractions suitable for modelling. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. et al. (Eds.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p.90-96.
- GIBBONS, J.M.; RAMSDEN, S.J.; BLAKE, A. Modelling uncertainty in greenhouse gas emissions from UK agriculture at the farm level. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.112, p.347-355, 2006.
- GLENDINING, M.J.; DAILEY, A.G.; WILLIAMS, A.G. et al. Is it possible to increase the sustainability of arable and ruminant agriculture by reducing inputs? **Agricultural Systems**, v.99, p.117-125, 2009.
- GOLUB, A.; HERTEL, T.; LEE, H. et al. The opportunity cost of land use and the global potential for greenhouse mitigation in agriculture and forestry. **Resource and Energetic Economics**, v.31, p.299-319, 2009.
- HUTCHINGS, N.J.; OLESEN, J.E.; PETERSEN, B.M. et al. Modelling spatial heterogeneity in grazed grassland and its effects on nitrogen cycling and greenhouse gas emissions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.121, p.153-163, 2007.
- HYMAN, R.C.; REILLY, J.M.; BABIKER, M.H. et al. Modeling non-CO₂ greenhouse gas abatement. **Environmental Modeling and Assessment**, v.8, p.175-186, 2002.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC [2006a]. In: **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 10/5/2011.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC [2006b]. In: **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. Emissions from livestock and manure management. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>. Acesso em: 10/5/2011.
- KAPARAJU, P.; RINTALA, J. Mitigation of greenhouse gas emissions by adopting anaerobic digestion technology on dairy, sow and pig farms in Finland. **Renewable Energy**, v.36, p.31-41, 2011.
- KEBREAB, E.; CLARK, K.; WAGNER-RIDDLE, C. et al. Methane and nitrous oxide from Canadian animal agriculture: a review. **Canadian Journal of Animal Science**, v.86, p.135-158, 2006.
- KEBREAB, E.; JOHNSON, K.A.; ARCHIBEQUE, S.L. et al. Model estimating enteric methane emissions from United States dairy and feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v.86, p.2738-2748, 2008.
- KULSHRESHTHA, S.N.; JUNKINS, B.; DESJARDINS, R. Prioritizing greenhouse gas emission mitigation measures for agriculture. **Agriculture Systems**, v.66, p.145-166, 2000.
- KÜSTERMANN, B.; KAINZ, M.; HÜLSBERGEN, K.J. Modeling carbon cycles and estimation of greenhouse gas emissions from organic and conventional farming systems. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v.23, n.1, p.38-52, 2008.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.D.; MACHADO, P. et al. Simulating trends in soil organic carbon of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the Century model. **Geoderma**, v.120, p.283-295, 2004a.
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; MACHADO, P. Simulation of organic matter dynamics in an argisol under mineral and organic fertilization with the century model. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.347-358, 2004b.
- LI, C.; FROLKING, S.; FROLKING, T.D. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: model structure and sensitivity. **Journal of Geophysical Research**, v.97, p.9759-9776, 1992.
- MAGID, J.; GORISSEN, A.; GILLER, K. E. In search of the elusive active fraction of soil organic matter - three size-density fractionation methods for tracing the fate of homogeneously c-14-labelled plant materials. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.89-99, 1995.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO - MAPA. **Programa agricultura de baixo carbono**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/desenvolvimento-sustentavel/programa-abc>. Acesso em: 10/5/2011.
- MCDERMOTT, J.J.; STAAL, S.J.; FREEMAN, H.A. et al. Sustaining intensification of smallholder livestock systems in the tropics. **Livestock Science**, v.130, p.95-109, 2010.
- MILLS, J.A.N. Modelling methane emissions from farm livestock. In: FRANCE, J.; KEBREAB, E. (Ed.) **Mathematical modelling in animal nutrition**. Oxfordshire: CABI, 2008. p.189-202.
- MILLS, J.A.N.; DIJKSTRA, J.; BANNINK, A. et al. A mechanistic model of whole-tract digestion and methanogenesis in the lactating dairy cow: model development, evaluation and application. **Journal of Animal Science**, v.79, p.1584-1597, 2001.
- MONTEIRO, R.B.N.C. **Desenvolvimento de um modelo para estimativas da produção de gases do efeito estufa em diferentes sistemas de produção de bovinos de corte**. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/Universidade de São Paulo, Piracicaba. Disponível em: www.teses.usp.br.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. **Nutrient requirements of beef cattle**. 7.ed.revised. Washington, D.C.: National Academic Press, 2000. 232p.
- NEELY, C.; BUNNING, S.; WILKES, A. **Review of evidence on dry lands pastoral systems and climate change**. Rome: FAO, Rome, 2009. 39p. (Land and Water Discussion Paper, 8).
- NEUFELDT, H.; SCHÄFER, M.; ANGENENDT, E. et al. Disaggregated greenhouse gas emission inventories from agriculture via a coupled economic-ecosystem model. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.112, n.2-3, p.233-240, 2006.
- NEUFELDT, H.; SCHÄFER, M. Mitigation strategies for greenhouse gas emissions from agriculture using a regional economic-ecosystem model. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.123, p.305-316, 2008.
- NGUYEN, T.L.T.; HERMANSEN, J.E.; MOGENSEN, L. Environmental consequences of different beef production systems in the EU. **Journal of Cleaner Production**, v.18, p.756-766, 2010.
- OGINO, A.; KAKU, K.; OSADA, T. et al. Environmental impacts of the Japanese beef-fattening system with different feeding lengths as evaluated by a life-cycle assessment method. **Journal of Animal Science**, v.82, p.2115-2122, 2004.
- OGINO, A.; ORITO, H.; SHIMADA, K. et al. Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow-calf system by the life cycle assessment method. **Animal Science Journal**, v.78, n.4, p.424-432, 2007.

- PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V. et al. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.530-536, 1987.
- PARTON, W.J.; OJIMA, D.S.; SCHIMEL, D.S. Environmental change in grasslands - assessment using models. **Climatic Change**, v.28, p.111-141, 1994.
- PAUSTIAN, K. Modelling soil organic matter dynamics – Global challenges. In: REES, R.M.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. (Eds.). **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p.43-53.
- PELLETIER, N.; PIROG, R.; RASMUSSEN, R. Comparative life cycle impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States. **Agricultural Systems**, v.103, n.6, p.380-389, 2010.
- PETERS, G.M.; ROWLEY, H.V.; WIEDEMANN, S. et al. Red meat production in Australia: life cycle assessment and comparison with overseas studies. **Environmental Science & Technology**, v.44, p.1327-1332, 2010.
- PHETTEPLACE, H.W.; JOHNSON, D.E.; SIEDL, A.F. Greenhouse gas emissions from simulated beef and dairy livestock systems in the United States. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.60, p.99-102, 2001.
- RIEDO, M.; GRUB, A.; ROSSET, M. et al. A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. **Ecological Modelling**, v.105, p.141-183, 1998.
- SCHILS, R.L.M.; VERHAGEN, A.; AARTS, H.F.M. et al. A farm model to define successful mitigation strategies for GHG emissions from livestock systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.71, p.163-175, 2005.
- SHEPPARD, S.C.; BITTMAN, S. Farm survey used to guide estimates of nitrogen intake and ammonia emissions for beef cattle, including early season grazing and biosphere effects. **Animal Feed Science and Technology**, doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.048, 2011.
- SILVEIRA, A.M.; VICTORIA, R.L.; BALLESTER, M.V. et al. Simulation of the effects of land use changes in soil carbon dynamics in the Piracicaba river basin, Sao Paulo State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.389-399, 2000.
- SISE, J.A.; KERSLAKE, J.I.; OLIVER, M.J. et al. Development of a software model to estimate daily greenhouse gas emissions of pasture-fed ruminant farming systems. **Animal Production Science**, v.51, n.1, p.60-70, 2010.
- STEINFELD, H.; GERBER, P.; WASSENAAR, T. et al. **Livestock's long shadow: environmental issues and options**. Rome: FAO, 2006. 390p.
- STEWART, A.A.; LITTLE, S.M.; OMINSK, K.H. et al. Evaluating greenhouse gas mitigation practices in livestock systems: an illustration of a whole-farm approach. **The Journal of Agricultural Science**, v.147, p.367-382, 2009.
- SUBAK, S. Global environmental costs of beef production. **Ecological Economics**, v.30, p.79-91, 1999.
- TEDESCHI, L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v.89, p.225-247, 2006.
- VAN DER MAAS, W.; COENEN, P.W.H.G. et al. **Greenhouse Gas Emissions in the Netherlands 1990-2006**. National Inventory Report 2008.PBL-report 500080009. Bilthoven, The Netherlands: Netherlands Environmental Assessment Agency, 2008.
- VERGÉ, X.P.C.; DYER, J.A.; DESARDINS, R.L. et al. Greenhouse gas emissions from the Canadian beef industry. **Agricultural Systems**, v.98, p.126-134, 2008.
- VEYSSET, P.; LHERM, M.; BÉBIN, D. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: Model-based analysis and forecast. **Agricultural Systems**, v.103, p.41-50, 2010.
- VEYSSET, P.; LHERM M.; BÉBIN, D. Productive, environmental and economic performances assessments of organic and conventional suckler cattle farming systems. **Organic Agriculture**, v.1, p.1-16, 2011.
- VUICHARD, N.; CIAIAS, P.; VIOVY, N. et al. Estimating the greenhouse gas balance of European grasslands with a process based model. Spatial and temporal patterns of radioactive forcing. **Global Biogeochemical Cycles**, v.21, 2007b.
- VUICHARD, N.; SOUSSANA, J.F.; VIOVY, N. et al. Simulating the greenhouse gas budget of European grasslands within a process driven approach: model evaluation against in-situ measurements. **Global Biogeochemical Cycles** v.21, doi:10.1029/2005GB002611, 2007a.
- WAGNER-RIDDLE, C.; KEBREAB, E.; FRANCE, J. et al. Supporting measurements required for evaluation of greenhouse gas emission models for enteric fermentation and store animal manure. In: FRANCE, J.; KEBREAB, E. (Eds.) **Mathematical modelling in animal nutrition**. Oxfordshire: CABI, 2008. p.204-224.
- WHEELER, D.M.; SHEPHERD, M.; POWER, I. Operational requirements of a farm-specific greenhouse gas model – lessons from using OVERSEER in a regulatory framework. In: GREENHOUSE GASES AND ANIMAL AGRICULTURE CONFERENCE, 2010, Banff, Canada. **Anais...** Banff, 2010. (CD-ROM).
- WHITE, T.A.; SNOW, V.O.; KING, W. Mc G. Intensification of New Zealand beef farming systems. **Agricultural Systems**, v.103, p.21-35, 2010.
- WILLIAMS, A.G.; AUDSLEY, E.; SANDARS, D.L. [2006]. **Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities**. Main Report. Defra Research Project IS0205. Bedford: Cranfield University and Defra. Available on <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk, and www.defra.gov.uk.> Acesso em: 20/5/2011
- WORLD BANK [2011]. In: **Brazil low carbon study**. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILEXTNResources/Brazil_LowcarbonStudy.pdf> Acesso em: 20/5/2011