

Estratégias para mitigar a produção de metano entérico

Vinicius da Silva Oliveira^{1}, José Adelson Santana Neto²,
Roberta de Lima Valença³, Ana Caroline Pinho dos Santos¹*

RESUMO

O objetivo da presente revisão é abordar as principais estratégias para mitigação da produção de metano (CH₄) pelos animais ruminantes. Dentre as atividades antrópicas, a pecuária é apontada como uma das maiores responsáveis pelo aquecimento global, visto que os ruminantes são grandes produtores de metano, que é um dos principais gases do efeito estufa, sendo o que mais retém calor na atmosfera terrestre. A metanogênese ruminal ocorre por conta das condições fermentativas do ambiente ruminal, e sua produção, além de causar impactos ambientais também significa redução da eficiência energética da dieta, afetando diretamente a produtividade animal. O metano produzido pelos ruminantes é uma das poucas fontes desse gás passível de ser manipulada pelo homem. Por essa razão, várias pesquisas têm sido conduzidas na tentativa de reduzir a emissão de CH₄ pelos animais ruminantes. Na tentativa de reduzir a metanogênese entérica, várias técnicas foram desenvolvidas, desde utilização de fármacos (ionóforos), como manipulação da dieta, incluindo carboidratos solúveis, forragem com maior digestibilidade e/ou com taninos e saponinas (fatores antinutricionais que manipulam a fermentação ruminal) e fontes de óleo. No entanto, cada técnica utilizada com a finalidade de reduzir a produção de metano ruminal, tem pontos pró e contra, que podem afetar negativamente a produção animal e até mesmo causar danos à saúde dos animais. Portanto, é necessário que se tomem cuidados quando se resolver adotar alguma das técnicas que visam mitigar a produção de CH₄ entérico.

Palavras-chaves: Aquecimento global; Dieta; Fermentação; Gás.

1. Introdução

As mudanças climáticas pelas quais o planeta Terra vem passando nos últimos anos fizeram com que as questões ambientais ganhassem destaque. O aumento da emissão de gases do efeito estufa, oriundos das

¹ Universidade Federal da Bahia.

² Universidade Federal da Paraíba.

³ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - Unesp/Jaboticabal - SP.

* Corresponding author: vinny_oliveira@yahoo.com.br

Artigo recebido em: 29/02/2016. Aceito para publicação em: 04/06/2017.

atividades antrópicas, acelera esse processo de mudanças climáticas (CARVALHO, 2009).

A atividade pecuária tem entrado no foco das discussões ambientais, tanto devido ao desmatamento de áreas de floresta para implantação de pastagens, quanto por ser responsável direto pela emissão de gases poluentes (CO_2 e CH_4). Os principais gases do efeito estufa são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), clorofluorcarbonos (CFCs) e ozônio (O_3) (LIMA, 2000). Esses gases são responsáveis por manter as condições climáticas da Terra, pois sem a presença deles na atmosfera terrestre a vida não seria possível, visto que o clima não se manteria constante. No entanto, a elevada produção destes gases tem levado ao aumento excessivo da temperatura do planeta (IPCC, 2001).

Dentre os gases do efeito estufa, o CH_4 é o que apresenta o maior potencial para retenção de calor, 25 vezes maior que o CO_2 (OLIVEIRA & IGARASI, 2013). O gás metano é oriundo da fermentação de compostos orgânicos. As principais fontes produtoras desse gás são os solos pântanos, lavouras de arroz, fermentação entérica, gás natural, aterros de lixo, oceanos e minas de carvão (CICERONE e OREMLAND, 1988; MILICH, 1999; AGOSTINETTO et al., 2002). O tempo de vida do gás CH_4 na atmosfera é de 9 a 15 anos, e sua produção cresce 7% ao ano (IPCC, 2006).

A pecuária representa uma das maiores fontes de produção de gases do efeito estufa, CH_4 , CO_2 e óxido nitroso, sendo esses gases produzidos pela fermentação no rúmen e intestino grosso (HISTOV et al., 2013a; HISTOV et al., 2013b). Os ruminantes são responsáveis por cerca de 17% do metano produzido e de 3,3% das emissões globais de gases do efeito estufa (KNAPP et al., 2014). O metano entérico está relacionado com o tipo do animal, com o consumo e digestibilidade do alimento (BERCHIELLI et al., 2012). Sendo que, essa é uma das poucas fontes produtora de CH_4 passível de ser manipulada (RIVEIRA et al., 2010), o que tem levado ao desenvolvimento de diversas pesquisas com esse intuito (STRADIOTTI JÚNIOR et al., 2004;

ABDALLA et al., 2008; POSSETINI et al., 2008; MACHADO et al, 2010; ARRIGONI et al, 2013; FREIRI, 2015). De acordo com Freiri (2015), ovinos e caprinos produzem entre 10 e 16 kg de CH₄/ano e bovinos entre 60 e 160 kg de CH₄/ano, sendo essa produção dependente do tamanho do animal e ingestão de matéria seca.

A metanogênese ruminal ocorre devido ao elevado potencial redutor e ambiente anaeróbico, o que diminui as opções metabólicas, levando os microrganismos a reduzirem CO₂ a CH₄, para obter os equivalentes redutores NADH (VALADARES FILHO & PINA, 2006). O CH₄ entérico produzido pelos ruminantes representa perda de 2 a 15% da energia dos alimentos (MOSS, 2000), significando, portanto, perda de energia para o animal. No entanto, a produção de CH₄ tem como objetivos remover os íons de H⁺ e regenerar os agentes redutores (NAD⁺), possibilitando a continuidade do processo fermentativo no ambiente ruminal, e atuando no controle do pH.

Os microrganismos responsáveis pela produção de CH₄ são as arqueobactérias, pertencentes ao gênero metanogênicas (CARDOSO et al., 2003) e os principais fornecedores de substrato para a ação dessas bactérias são os protozoários. Pois, de acordo com os mesmos autores, a degradação da fibra leva a liberação de hidrogênio no ambiente ruminal, que é utilizado para a síntese de metano pelas bactérias metanogênicas.

Nesse sentido, estudos têm sido conduzidos no intuito de suprimir parcialmente a atividade dos protozoários no rúmen, como forma de mitigar a metanogênese ruminal. No entanto, tem que se adotar estratégias alimentares adequadas para que a supressão de protozoários não afete o desempenho dos animais (MACHMÜLLER & KREUZER, 1999).

Inicialmente foram desenvolvidos aditivos químicos (ionóforos) como alternativa para reduzir a produção de CH₄ pelos ruminantes. Entretanto, a utilização de ionóforos vem sendo criticada por se tratar de aditivos à base de antibióticos. O que pode deixar resíduos nos produtos de origem animal e

aumentar a resistência das bactérias patogênicas ao princípio ativo desses antibióticos. Por essa razão, os países da União Europeia proibiram o uso destes aditivos, o que resultou no desenvolvimento de pesquisas com manipulação da dieta (MOURÃO et al., 2012). Dentre as formas de se manipular a dieta, o uso alimentos que possuam alto teor de óleo têm sido apontados como alternativa para reduzir a produção de CH₄ (JOUANY, 1994; McALLISTER et al., 1996). A utilização de dietas com maior digestibilidade e menor teor de parede celular também têm sido utilizadas com a finalidade de reduzir a metanogênese entérica.

Com base no exposto acima, o objetivo da presente revisão é abordar as principais estratégias para mitigação da produção de metano pelos animais ruminantes.

2. Desenvolvimento

Metanogênese ruminal

A fermentação dos carboidratos celulolíticos da dieta pelos microrganismos ruminais resulta na formação de ácidos graxos voláteis (AGV's), vitaminas do complexo B e vitamina K, proteína microbiana e de gases (CO₂ e CH₄). Os AGV's são utilizados como fonte de energia e os gases CO₂ e CH₄ são perdidos via eructação e/ou respiração (MARTIN et al., 2009). O CH₄ é produzido no rúmen na concentração de 30 a 40%, juntamente com CO₂ (60%) e quantidades variáveis de N₂ e traços de H₂S, H₂ e O₂ (VALADARES FILHO e PINA, 2006).

Segundo Pereira et al. (2013), 85 a 90% do metano produzido pelos ruminantes é proveniente da fermentação entérica, sendo os dejetos responsáveis pelo restante. Do CH₄ entérico, 95% é excretado via eructação, do produzido pelo trato digestório posterior, 89% é excretado pela respiração, sendo liberado via inspiração, e cerca de 1% pelo ânus (MURRAY et al., 1976).

O metano entérico é proveniente da atividade dos microrganismos *Archaea* metanogênicas pertencentes aos gêneros: *Methanobrevibacter*, *Methanobacterium*, *Methanomicrobium* e *Methanosarcina*, e fungos e protozoários pertencentes à *Eukarya* (LANGE et al., 2005).

A proporção de cada um dos produtos da fermentação ruminal depende da espécie bacteriana (que é específica para cada substrato), da dieta e, fundamentalmente, da concentração de nicotinamida adenosina difosfato (NAD⁺) e de H₂ (KOZLOSKI, 2002). Sendo que a concentração de H₂ influencia diretamente a metanogênese ruminal (CHAUCHEYRAS et al., 1995; PEREIRA et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2013), que também é influenciada pelo tipo e nível produtivo do animal (NEVES, 2008). A dieta é o fator primário que afeta a produção de metano no rúmen, por ser fornecedora de substrato para as bactérias metanogênicas (FREIRE, 2015).

A produção de CH₄ no rúmen acontece em três etapas: primeiro ocorre a hidrólise de polímeros orgânicos, como lipídios, polissacarídeos, proteína e gorduras, convertendo esses polímeros em monômeros solúveis; em seguida ocorre a fermentação desses monômeros levando à formação de H₂, CO₂ e os AGV's, as duas primeiras etapas ocorrem por ação de bactérias anaeróbicas (*Bacteriodes*, *Clostridium* e *Streptococcus*); posteriormente ocorre a conversão do acetato, H₂ e CO₂ em CH₄, por ação dos microrganismos metanogênicos (FREIRE, 2015).

Para que o processo fermentativo no rúmen ocorra é necessária a presença de agentes redutores (NAD⁺), os quais são convertidos pela ação fermentativa da microbiota ruminal em NADH + H₂ (FREIRE, 2015). As bactérias metanogênicas, os elétrons do NADH e o H₂ são úteis para sintetizar o metano, regenerando, dessa forma, a concentração de NAD⁺ no ambiente ruminal, para que o processo fermentativo possa ter continuidade (NOLAN et al., 2010).

O principal percussor de CH₄ no rúmen é o formato, que tem sua síntese por meio do CO₂ e H₂ presentes no rúmen (OLIVEIRA et al., 2013).

A síntese de CH₄ no rúmen requer a presença de ATP e coenzima-A, sendo estimulada pela ferredoxina, ocorrendo clivagem da metil-cobalamina na reação final, formando metano e cobalamina (BERCHIELLE et al., 2006). Nesta reação ocorre a regeneração do NAD⁺, por meio da adição de uma molécula de H₂, maximizando o rendimento energético da fermentação dos carboidratos sem interferir no piruvato e no acetil-CoA (NEVES, 2008).

Apesar de a metanogênese consumir energia, drenando hidrogênio proveniente das demais reações químicas no rúmen, ela aumenta o rendimento total de ATP (NEVES, 2008). Isso ocorre porque a produção de metano reduz o CO₂ com adição de hidrogênio, utilizando o acetato e outros compostos do grupo metil para obter energia promovendo o crescimento das bactérias metanogênicas (PATRA, 2012). O maior crescimento dessas bactérias aumenta a disponibilidade de proteína microbiana para o ruminante (NEVES, 2008).

Esse processo também reduz a concentração de H₂ no rúmen, o que auxilia na manutenção das condições ideais de pH ruminal, permitindo o desenvolvimento dos microrganismos fermentadores de fibra e das bactérias metanogênicas. A produção de metano é a principal via de eliminação de hidrogênio do rúmen, a reação que esquematiza a produção de metano é: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ (MOSS et al., 2000). Por reduzir a concentração de H₂ e promover aumento da microbiota ruminal, ela também é benéfica ao ruminante. A produção de CH₄ é uma etapa limitante à fermentação ruminal, por regenerar o NAD⁺ possibilitando a continuidade da fermentação ruminal, evitar a concentração de hidrogênio e ácidos graxos de cadeia curta no rúmen, evitando assim o abaixamento do pH (LIU & WHITMAN, 2008).

Apesar dos efeitos benéficos da metanogênese ruminal, como aumento da proteína microbiana e remoção de H₂ do rúmen, estima-se que há perda de 2 a 12% da energia dos alimentos por meio da produção de metano, sendo maior essa perda em animais alimentados com forragem (WEIMER, 1998).

A maior produção desse gás pode reduzir o desempenho animal devido à perda de energia, no entanto, isso não afeta a saúde animal.

Outra forma de reduzir a produção de metano é aumentar a eficiência produtiva do sistema (MILLER, 1995; JOHNSON & JOHNSON, 1995; McALLISTER et al., 1996), visto que em sistemas que visam a produção de carne, o aumento da eficiência produtiva do animal reduz seu tempo de permanência no sistema de produção, diminuindo dessa forma a produção daquele gás durante seu ciclo de vida (MOSS & GIVENS, 2002).

Por ser um gás com grande potencial poluidor e significar perda energética para o animal, reduzindo a produtividade, pesquisas vêm sendo desenvolvidas na tentativa de diminuir a produção de CH₄ pelos ruminantes.

Forragem e produção de metano ruminal

Animais alimentados à base de forragem têm maior produção de metano, por conta da fermentação dos carboidratos estruturais que compõe a parede celular das plantas. Essa fermentação altera a relação acetato:propionato, e o acetato juntamente com o butirato aumentam a liberação de H₂ (JOHNSON e JOHNSON, 1995; NUSSIO et al., 2006; OLIVEIRA et al., 2013), que é substrato para formação de CH₄.

As gramíneas de clima tropical diferem das de clima temperado quanto à produção de metano (BERCHIELLI et al., 2012), por conta da composição da parede celular e da relação entre a parede e o conteúdo celular (PEDREIRA et al., 2009). As gramíneas tropicais pertencentes ao grupo C4 aumentam a produção de CH₄ entérico, por possuírem maior teor de carboidratos estruturais e menor digestibilidade. De acordo com Berchielli et al. (2012), a escolha de forragens com alta concentração de carboidratos solúveis, consorciada com leguminosas que possuam compostos metabólicos secundários como taninos é uma eficiente estratégia para reduzir a metanogênese ruminal. Esses mesmos autores também destacam

que plantas que contenham saponinas podem ser utilizadas, desde que não interfiram no consumo e digestibilidade da dieta.

As diferenças na composição dos carboidratos entre os tipos de gramíneas influenciam diretamente na produção de metano (PEREIRA et al., 2013). A digestão da celulose gera três vezes mais CH_4 que de hemicelulose (MOE e TYRREL, 1979). A digestão de carboidratos estruturais gera maior emissão de metano, pois a celulose e hemicelulose têm fermentação mais lenta que os carboidratos não estruturais, além de terem maior tempo de permanência no ambiente ruminal (McALLISTER et al., 1996).

A utilização de forragens mais jovens, e de melhor qualidade, com maior quantidade de carboidratos solúveis e menor teor de fibras reduz a produção de CH_4 (BEAUCHEMIN et al., 2008; ULYATT et al., 2002). Isso aumenta a eficiência energética da digestão ruminal, além de melhorar o desempenho dos animais (BLAXTER e CLAPPERTON, 1965).

Forragens de melhor qualidade, também têm menor tempo de permanência no rúmen, reduzindo ainda mais a metanogênese ruminal. As emissões de metano também são geralmente mais baixas com maior proporção de leguminosas forrageiras na dieta, em parte devido ao menor teor de fibra e ao ritmo mais rápido de passagem, e em alguns casos a presença de taninos condensados (BEAUCHEMIN et al., 2008). Possetini et al. (2008), avaliando os efeitos de dietas contendo leucena e levedura sobre a fermentação ruminal e produção de metano, observaram o uso de 17,2% na emissão desse gás quando adicionado na dieta 20% de leucena.

A utilização de concentrado na dieta dos animais também reduz a produção de CH_4 entérico, pois o concentrado tem maior quantidade de carboidratos solúveis e maior digestibilidade. Isso reduz o substrato para síntese de metano, e a produção total por animal também diminui, pois, os animais são abatidos mais jovens (LIMA et al., 2007).

O concentrado reduz o pH ruminal, afetando diretamente as bactérias metanogênicas. Visto que, essas bactérias são muito sensíveis à alterações do ambiente ruminal, principalmente no pH necessitando que este esteja o mais próximo da neutralidade (5,8 a 6,5) (BERCHIELLI et L., 2006).

No entanto, somente em dietas com inclusão acima de 60% de concentrado é que se observa efeito da redução da produção de metano (BERCHIELLI et al., 2003). Visto que, é a partir dessa proporção de concentrado na dieta que ocorre diminuição significativa do pH ruminal. Em dietas com baixa inclusão de concentrado é observado aumento da produção de CH₄, pois favorece os microrganismos fibrolíticos, por disponibilizar maior quantidade de energia para degradação da fibra (BERCHIELLI et al., 2003; PRIMAVESI et al., 2004). Isto ocorre por conta da maior disponibilidade de carboidratos solúveis, que podem ser utilizados como fonte energética pelos microrganismos metanogênicos. Já em dietas com mais de 60% de concentrado, a fermentação dos carboidratos solúveis gera maior redução no pH, e as bactérias metanogênicas não toleram pH muito baixo, em torno de 5,5 (BERCHIELLI et al., 2003). Silva (2015), estudando o efeito de dietas contendo silagem de milho ou cana-de-açúcar com 30 ou 50% de concentrado sobre a produção de metano, observou que houve maior produção de metano nos animais alimentados com dieta contendo 50% de concentrado, assim como houve maior produção nos animais alimentados com cana-de-açúcar.

Outro fator que contribui para a redução da metanogênese ruminal, em dietas contendo maior teor de carboidratos solúveis, é que estes carboidratos aumentam a proporção de propionato no rúmen, e o propionato, para ser sintetizado, consome H₂, portanto, a relação acetato: propionato no rúmen influencia na produção de CH₄ (HEGARTY, 2001). A equação geral da formação de propionato no rúmen é $11 \text{ hexose} + 22 \text{ H}_2 \rightarrow 22 \text{ propionato} + 22 \text{ H}_2\text{O}$ (HUNGATE, 1996).

Canesin (2009) avaliando a produção de CH₄ em bovinos Nelore, mantidos em pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, recebendo diferentes frequências de suplementação, observou que a produção de metano foi de 176,8 g/dia e 311,0 g/dia para os meses de setembro e novembro, respectivamente. Esses resultados evidenciam que a redução na qualidade da forragem, que ocorre no mês de seca, leva a maior produção desse gás.

Kurihara et al. (1999) observaram perda energética de 10,4% em bovinos alimentados com capim-rodas (*Chloris gayana*) e 11,4% com capim-ingleton (*Dicanthium aristatum*), ambas forrageiras de clima tropical. Esses mesmos autores concluíram que gramíneas tropicais, que possuem metabolismo C₄, e maior teor de fibra e lignina, geram maior produção de CH₄ que gramíneas temperadas, com metabolismo C₃, e menor teor de fibra e lignina, sendo que, a adição de concentrado acima de 80% da dieta leva à redução significativa na produção de metano.

De acordo com Cardoso (2012), a produção desse gás de animais mantidos em pastagens degradadas no Brasil é de 25.227 kg, enquanto a produção em sistemas intensivos, pastagens bem manejadas e confinamento, a produção reduz para 16.685 kg.

McCaughey et al. (1999), estudando a produção de metano em bovinos em pastejo, recebendo dieta exclusiva de gramínea ou uma dieta contendo alfafa e gramínea, com relação 70:30, observaram que houve redução de 10% na produção de CH₄ por unidade de produto nos animais recebendo a dieta com alfafa e gramínea. Esse efeito da leguminosa sobre a emissão de metano pode estar associado pela presença de taninos condensados nessas forrageiras (WAGHORN, 2007), além do baixo teor de fibra, e da maior taxa de passagem no rúmen (O'MARA et al., 2004).

Taninos e os efeitos na produção de metano

Os taninos são substâncias polifenólicas de elevado peso molecular e complexidade (MACHADO et al., 2011). Os taninos se dividem em dois grupos, os hidrosolúveis e os condensados, sendo que os condensados são que apresentam maior efeito na manipulação da fermentação ruminal. Os taninos hidrosolúveis são potencialmente tóxicos para os animais, apesar de também afetarem a metanogênese ruminal (FIELD et al., 1989).

Os taninos normalmente estão associados a fatores antinutricionais na dieta, por deprimir o consumo e se complexar principalmente com proteínas e a parede celular da planta (hemicelulose e celulose) reduzindo sua digestibilidade (BARRY e McNABB, 1999, SCHOFIELD et al., 2001, McSWEENEY et al., 2001). No entanto, se utilizados em baixas concentrações na dieta, os taninos podem ter efeitos benéficos na manipulação da fermentação ruminal (MORAIS et al., 2006). Os taninos se encontram em vacúolos dentro da célula da planta, não tendo interferência em seu metabolismo e agindo apenas quando há ruptura dessas estruturas, como no ato da mastigação (MIN et al., 2003).

O efeito dos taninos na redução da metanogênese ruminal pode ser atribuída a dois fatores: um indireto, por reduzir a produção de H₂ no rúmen e a degradação da fibra; e outro direto, por inibir as bactérias metanogênicas (Woodward et al., 2001). De acordo com Puchala et al. (2005), dietas contendo teores baixo a moderado de taninos condensados (2 a 17%) diminuem a emissão de metano em ruminantes.

Tiemann et al. (2008), incluindo leguminosas com alto teor de tanino (*Callinadra calothyrsus* e *Fleminga macrophylla*) na dieta de carneiros, observaram redução de 24% na emissão de metano estando essa associada à redução da digestibilidade da matéria orgânica. Sarvanan (2000), incluindo extrato solidificado das folhas de *Uncaria gambir* contendo 49% de tanino condensado na dieta de carneiros, observou significativa redução na perda

de energia na forma de CH₄ e queda de 75% no número de protozoários ciliados.

Puchala et al. (2005) observaram redução de 50% na produção de metano em animais recebendo dieta com 17% de taninos condensados, presente em uma leguminosa, em comparação com animais alimentados com gramínea contendo 0,5% deste composto. Junior Perna et al. (2012) observaram redução na perda de energia relativa ao metano em animais recebendo dieta controle (sem aditivos) em comparação aos animais recebendo extrato concentrado com tanino obtido de Acácia-Negra de 15,27% para 11,74%, respectivamente.

Carulla et al. (2005) observaram que houve redução na produção de CH₄ em 130 kJ/MJ, em ovinos alimentados com uma mistura de *Lolium perenne* e *Trifolium pratense* ou *M. Sativa*, recebendo suplementação com 29 g/kg de matéria seca de *Acacia mearnsii*. Ramirez-Restrepo & Barry (2005) afirmam que ovinos alimentados com forragens que contenham taninos condensados têm redução na produção de metano.

Utilização de ionóforos para reduzir a metanogênese ruminal

O uso de ionóforos tem por objetivo manipular a fermentação ruminal, aumentando a proporção molar de propionato e reduzindo a de acetato e butirato, e como consequência diminui a produção de metano (RICHARDSON et al., 1976; MOURTHE et al., 2011). O uso de ionóforos como estratégia para reduzir a produção de CH₄ entérico foi proposta por Guan et al. (2006). Segundo esses autores, os ionóforos não inibem diretamente as bactérias metanogênicas, eles reduzem o substrato necessário para que elas produzam CH₄ (H₂ e formato).

Os ionóforos são produtos da fermentação de espécies de fungos *Streptomyces*, existem mais de 120 tipos de ionóforos, no entanto, os únicos que são aprovados para uso na alimentação de ruminantes são: Monensina, Lasalocida, Narasina e Salinomocina (NAGARAJA et al., 1997).

Os ionóforos são antibióticos que agem de forma seletiva sobre a microbiota ruminal, essa seletividade depende da permeabilidade do invólucro celular do microrganismo (MILLEN et al., 2007). Nas bactérias gram-positivas, o invólucro é composto apenas de parede celular, o que as tornam permeáveis aos ionóforos, sendo inibidas por esses. Já as bactérias gram-negativas possuem um invólucro formado de parede celular com uma membrana externa, protegendo-as da ação dos ionóforos (NICODEMO, 2001).

Os ionóforos recebem esse nome pelo mecanismo de ação, eles aumentam a permeabilidade da membrana da parede celular bacteriana a íons, principalmente potássio e hidrogênio, e em menor grau a cálcio e sódio. Os ionóforos se ligam aos cátions presentes na membrana celular da bactéria que tenham maior afinidade, sendo transportados para o interior da célula. Então a bomba iônica da célula bacteriana entra em ação, na tentativa de manter o equilíbrio iônico, até o esgotamento da energia, o que leva ao desequilíbrio eletrolítico. Devido à elevada concentração de íons no interior da célula bacteriana, aumenta a pressão osmótica havendo entrada excessiva de água, o que leva a lise da membrana celular, culminando na morte da bactéria (MILLEN et al., 2007). Segundo Tedeschi et al. (2003), o uso de ionóforos em dieta de ruminantes pode reduzir a metanogênese em 25% e a ingestão de matéria seca em 4%, no entanto, não afeta o desempenho dos animais.

No caso da monensina, não é observada inibição direta das bactérias metanogênicas, seu efeito é indireto na redução do metano possivelmente devido à inibição de protozoários, que produzem hidrogênio que é o substrato utilizado pelas metanogênicas (RUSSELL e STROBEL, 1989; GUAN et al., 2006). O uso da monensina diminui a ingestão de alimentos, sendo geralmente notado seu efeito em bovinos confinados. Isso melhora a eficiência alimentar na ordem de 7,5% em relação aos animais não alimentados com monensina (GOODRICH et al., 1984). Da mesma forma, são relatadas melhorias na eficiência alimentar em bovinos confinados de

5,6, 7,5, e 8,1% ao serem alimentados com propionato laidlomycin (BAUER et al., 1995), lasalocida (BERGER et al., 1981), e salinomicina (ZINN, 1986), respectivamente.

Silveira et al. (2016), estudando o efeito da adição de ácidos orgânicos ou monensina sódica na produção de metano por meio da fermentação *in vitro*, observaram que o uso da monensina reduziu a produção desse gás em 60%, e aumentou a produção de propionato. Estudos *in vitro* indicam que a monensina reduz as emissões de metano em até 25% (VAN NEVEL & DEMAYER, 1995), alcançando reduções na produção total de CH₄ de 48, 52 e 58%, como foi observado quando se utilizou a técnica de gás *in vitro* com inclusão de 2,5; 5,0 e 12,5 mg/L de monensina, respectivamente (RUSSELL & STROBEL, 1989). Odongo et al. (2007), avaliando o uso de monensina na dieta de vacas de leite, observaram que houve redução da produção de CH₄ de 7 a 9% e no teor de proteína e gordura do leite em 9 e 4%, respectivamente. A menor produção de CH₄ com o uso de monensina pode estar associada ao fato de que há redução na produção de acetato e consequentemente de CO₂ e H₂ (CALLAWAY et al., 2003).

Entretanto, Grainger et al. (2010), avaliando o uso de monensina em alta dose (471 mg/dia) em vacas de leite a pasto recebendo suplementação, observaram que não houve efeito da monensina sobre a produção de metano; esses autores concluíram que a monensina não é uma estratégia eficiente para reduzir a metanogênese em vacas de leite suplementadas a pasto. Rivera et al. (2010), avaliando o efeito da monensina sobre a produção de CH₄ *in vitro* em bovinos alimentados com feno de Tifton 85 e concentrado, na proporção 80:20, não observaram diferença na produção de metano.

A virginiamicina é um antibiótico natural não ionóforo, que tem efeito na manipulação da fermentação ruminal. Ela é formada por meio da fermentação de bactérias *Streptomyces virginiae*, gerando dois produtos químicos distintos, o fator M (C₂₈H₃₅N₃O₇) e fator S (C₄₃H₄₉N₇O₁₀), que possuem ação sinérgica quando combinados na proporção de 4:1,

respectivamente (DeSOMER & VAN DIJCK, 1955; CROOY & DE NEYS, 1972; NAGARAJA et al., 1998).

Os fatores M e S, que compõem a virginiamicina, são peptídeos que inibem o crescimento de bactérias gram-positivas (COCITO, 1979), esses fatores, quando isolados, possuem ação bacteriostática, no entanto, quando combinados, são bactericidas (COCITO et al., 1997). A ação da virginiamicina se dá pela ligação do fator M, gerando alterações na conformação da subunidade ribossômica 50S das bactérias gram-positivas, o que inibe a síntese de proteína no interior da célula bacteriana (MACIEL et al., 2015).

O efeito da virginiamicina sobre a metanogênese ruminal está associado a alguns fatores como: efeito tóxico sobre as bactérias metanogênicas, efeito sobre os protozoários ou alteração do padrão fermentativo, aumentando a proporção de propionato, o que direciona o H_2 a outras rotas que não sejam a produção de CH_4 . Clayton et al. (1996), testando a inclusão de virginiamicina na dieta de ovinos alimentados com feno e concentrado, observaram que houve redução da produção de metano com a inclusão da virginiamicina.

Fonseca (2014), avaliando a produção de CH_4 em animais recebendo monensina, virginiamicina e uma associação monensina + virginiamicina, observou que houve redução da produção de metano na utilização dos dois aditivos, no entanto, a associação dos dois levou a uma maior redução da metanogênese. Coe et al. (1999), avaliando o efeito da virginiamicina na fermentação ruminal de bovinos, observaram redução do pH, da produção de acetato e aumento na produção de propionato. Esses efeitos da virginiamicina sobre a fermentação ruminal indiretamente afetam a metanogênese ruminal, pois as bactérias desse processo atuam em faixas de pH mais altas e a produção de propionato leva ao consumo de H_2 no rúmen, como já discutido.

Efeito dos ácidos graxos e óleos essenciais sobre a produção de metano entérico

Os ácidos graxos de cadeia média (11 a 16 carbonos) têm efeitos antiprotozoários potentes (NEWBOLD e CHAMBERLAIN, 1988; MATSUMOTO et al., 1991; HRISTOV et al., 2004), portanto podem ser utilizados para redução da produção de metano entérico. Além disso, eles podem ser utilizados rotineiramente e têm o potencial para substituírem produtos químicos antiprotozoários perigosos, como os ionóforos (FACIOLA et al., 2012). As fontes de origem vegetal que possuem ácidos graxos insaturados em sua composição podem ser utilizadas para manipular a fermentação ruminal (HRISTOV et al., 2003).

A utilização de ácidos graxos como suplemento alimentar leva à redução acentuada na população de protozoários ciliados no rúmen (NAGARAJA et al., 1997). Isso ocorre devido a dois fatores: primeiro o lipídio envolve a fibra reduzindo assim a ação fibrolítica dos protozoários, o que diminui o substrato necessário para seu crescimento, e em segundo os ácidos graxos insaturados têm efeito deletério sobre os protozoários, pois tornam a membrana celular mais permeável, o que leva a lise da membrana, causando dessa forma a morte do microrganismo. A utilização de óleos de linhaça, coco, canola e ácido láurico tem levado à redução significativa na quantidade de protozoários no rúmen (MATSUMOTO et al., 1991; MACHMÜLLER e KREUZER, 1999; DOHME et al., 2000; MACHMÜLLER et al., 2000). Nesse sentido, os microrganismos tendem a realizar a biohidrogenação, para reduzir os efeitos deletérios dos ácidos graxos insaturados.

De acordo com Pereira et al. (2013), os ácidos graxos de cadeia longa têm efeito tóxico, principalmente em bactérias gram-positivas, por agir sobre a membrana celular. Foi observado efeito tóxico do ácido linoleico sobre as bactérias celulolíticas (*F. succinogenes*, *R. albus* e *R. flavefaciens*) e para fungos *Neocallimastix frontalis* cultivados *in vitro* (MAIA et al., 2007). Esse

efeito sobre os microrganismos degradadores de fibra, tanto reduz a liberação de H_2 no ambiente ruminal, quanto aumenta a captação desse, por promover aumento na produção de propionato, que consome H_2 . Outro fator que leva à redução de H_2 no ambiente ruminal com a utilização de ácidos graxos insaturados é a biohidrogenação, que consiste no rompimento das duplas ligações com adição de hidrogênio nos carbonos onde estão localizadas essas ligações, o que leva ao consumo de H_2 no rúmen.

O ácido fumárico tem sido proposto como um potencial aditivo na redução do CH_4 , pois proporciona um dissipador de elétron alternativo e é um precursor metabólico de propionato. A estequiometria do metabolismo fumarato na fermentação ruminal indica resultados potencialmente promissores (UNGERFELD et al., 2007), no entanto, o fumarato não foi consistentemente eficaz na diminuição da produção de metano *in vivo* (McGINN et al., 2004; BEAUCHEMIN e McGINN, 2006).

Os óleos essenciais são aditivos que incluem compostos derivados de plantas que normalmente exercem um efeito antimicrobiano, que leva a uma alteração do perfil de fermentação (DiLORENZO, 2011). Os óleos essenciais são misturas de metabolitos secundários produzidos por plantas e, devido a sua natureza volátil, são recuperados por destilação a vapor de materiais vegetais (CALSAMIGLIA et al., 2007). Desde a proibição do uso de antibióticos como promotores de crescimento na União Europeia em janeiro de 2006 (Regulamento 1831/2003/EC), a pesquisa sobre os efeitos de óleos essenciais tem aumentado bastante.

O uso de óleos essenciais pode ser eficaz em alterar as proporções de AGV's no rúmen (DiLORENZO, 2011). De acordo com esse autor, os óleos essenciais podem aumentar ou diminuir as proporções molares de acetato:propionato reduzindo a metanogênese devido ao consumo de equivalentes redutores pelo propionato.

Franco et al. (2013), estudando a produção de metano *in vitro* em dietas experimentais contendo níveis de substituição de farelo de soja por

torta de girassol, observaram redução na produção de CH₄ de 137,34; 108,13; 112,45; 116,98 e 111,08 de ml/L de CH₄ nas dietas contendo os níveis de 0, 0,25, 0,5, 0,75 e 1 kg/kg de PB de substituição. Kumar et al. (2007), avaliando a produção de metano *in vitro* de misturas de feno de trigo e tortas oleaginosas na proporção de 3:1 durante um período de 24 horas, observaram que não houve diferença na produção de metano entre as dietas com torta de algodão e torta de soja.

A ação dos óleos essenciais inibe a degradação da fibra pelos protozoários do rúmen e reduz a liberação do H₂, diminuindo assim o substrato disponível para as metanogênicas sintetizarem o CH₄. Watanabe et al. (2010) observaram que o extrato da castanha de caju tem propriedades antimicrobianas, isso está relacionado com seu conteúdo de ácido anacárdico, cardanol e cardol, que são derivados do ácido salicílico com um grupo alquilo C-15.

Morgado et al. (2012), avaliando a produção de CH₄ *in vitro* em dietas contendo alto teor de amido ou FDN associada ou não com óleo de girassol, observaram que a inclusão de óleo nas dietas reduziu significativamente a produção de CH₄. Beauchemin et al. (2008), revisando a adição de lipídeos na dieta sobre a emissão de metano, encontraram que a cada 1% de adição de lipídio na matéria seca há uma redução de 5,6% na emissão de metano. Yadeghari et al. (2015), avaliando o efeito da adição de óleo essencial na produção de desse gás ruminal, observaram que houve a redução na produção de metano de 4,22; 4,32; 4,03; 2,51 e 1,81 ml/100g de MS para os níveis de 0, 250, 500, 750 e 100 µl/L de inclusão de óleos essenciais na dieta.

Apesar dos benefícios da adição de lipídeos em dietas de ruminantes, é recomendado que sejam incluídos de 6 a 7% na MS, pois inclusões maiores podem levar à queda no consumo. Além disso, o excesso de lipídeos pode prejudicar o processo de digestão, pelo efeito tóxico sobre as bactérias metanogênicas que pode gerar o acúmulo de hidrogênio no rúmen (PEREIRA et al., 2013), o que leva ao desequilíbrio do pH ruminal.

3. Conclusões

A produção de metano pelos ruminantes é consequência dos processos fermentativos e das condições nas quais esses processos ocorrem. Essa produção traz alguns benefícios para os animais, como auxiliar na regulação do pH e reconstitui os equivalentes redutores no rúmen. Porém, a metanogênese ruminal também significa perda de energia da dieta, além do CH₄ ser um gás com grande potencial poluidor. Por essa razão, foram desenvolvidas diversas técnicas no intuito de mitigar a metanogênese ruminal, sendo que todas essas técnicas possuem fatores favoráveis e desfavoráveis para serem utilizadas, sendo, portanto, importante tomar os devidos cuidados quando se optar por adotar alguma estratégia para se reduzir a produção de metano entérico.

Ruminal methanogenesis and strategies to mitigate enteric methane production

Abstract

The objective of this review is to address the main strategies for mitigation of methane production by ruminants. Among the anthropogenic activities cattle ranching are considered one of the most responsible global warming. Given that, ruminants are major producers of methane, which is a major greenhouse gas, is what retains more heat in the atmosphere. The ruminal methanogenesis occurs on account of the rumen fermentation conditions, and its production besides causing environmental impacts, also means reducing the energy efficiency of the diet, directly affecting animal productivity. The methane produced by the ruminants is one of the few such sources capable of being manipulated by man gas. Therefore, various researches have been conducted in an attempt to reduce methane emission by ruminants. In an attempt to reduce methanogenesis enteric, several techniques have been developed from use of drugs (ionophore) as dietary manipulation, including soluble carbohydrate material with higher digestibility and / or tannins and saponins (antinutritional factors that manipulate rumen fermentation) and sources of oil. However, each technique in order to reduce ruminal methane production, has pro and con points which can adversely affect animal production and even cause damage to the health of animals. Therefore, it is necessary to take care

when resolving to adopt some of the techniques to mitigate enteric methane production.

Keywords: global warming; diet; fermentation; gas.

Referências

ABDALLA, A.L.; SILVA FILHO, J.C.; GODOI, A.R.; CARMO, C.A.; EDUARDO, J.L.P. Utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de ruminantes. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, sup. esp., p.260-258, 2008.

AGOSTINETTO, D.; FLECK, N. G.; RIZZARDI, M.A.; JUNIOR BALBINOT, A.A. Potencial de emissão de metano em lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.32, n.6, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782002000600026>

ARRIGONI, M.B.; MARTINS, C.L.; BARDUCCI, R.S.; FRANZÓI, M.C.S.; VIEIRA JÚNIOR, L.C.; PERDIGÃO, A.; RIBEIRO, F.A.; FACTORI, M.A. Níveis elevados de concentrado na dieta de bovinos em confinamento. **Veterinária e Zootecnia**, v.20, n.4, p.539-551, 2013.

BARRY, T.N.; McNABB, W.C. The implications of condensed tannins on the nutritive value of temperate forages fed to ruminants. **British Journal of Nutrition**, v.81, p.263-272, 1999.

BAUER, M.L.; HEROLD, D.W.; BRITTON, R.A.; STOCK, R.A.; KLOPFENSTEIN, T.J.; YATES, D.A. Efficacy of laidlomyc in propionate to reduce ruminal acidosis in cattle. **Journal of Animal Science**, v.73, p.3445-3454, 1995. <https://doi.org/10.2527/1995.73113445x>

BERGER, L.L.; RICKE, S.C.; FAHEY JR, G.C. Comparison of two forms and two levels of lasalocid with monensin on feedlot cattle performance. **Journal of Animal Science**, v.53, p.1440-1445, 1981. <https://doi.org/10.2527/jas1982.5361440x>

BEAUCHEMIN, K.A.; KREUZER, M.; O'MARAC, F.; McALLISTER, T.A. Nutritional management for enteric methane abatement: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.48, p.21-27, 2008. <https://doi.org/10.1071/EA07199>

BEAUCHEMIN, K.A.; MCGINN, M.; Enteric methane emissions from growing beef cattle as affected by diet and level of intake. **Canada Journal Animal Science**, v.86, p.401-408, 2006. <https://doi.org/10.4141/A06-021>

BERCHIELLI, T.T.; PIRES, A.V.; OLIVEIRA, S.G. **Nutrição de Ruminantes**. Jaboticabal: Funep, 2006.

BERCHIELLI, T.T.; PEDREIRA, M.S.; OLIVEIRA, S.G.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M.; FRIGUETO, R.T.S. Determinação da produção de metano e pH ruminal em bovinos de corte alimentados com diferentes relações volumoso:concentrado. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 40., Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, SBZ, 2003.

BERCHIELLI, T.T.; MESSANA, J.D.; CANESIN, R.C. Produção de metano entérico em pastagens tropicais. **Revista de Saúde e Produção Animal**, v.13, n.4, p.954-968, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-99402012000400010>

BLAXTER, K.L.; CLAPPERTON, J.L. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. **British Journal of Nutrition**, v.19, p.511-522, 1965. <https://doi.org/10.1079/BJN19650046>

CALSAMIGLIA, S.; BUSQUET, M.; CARDOZO, P. W.; CASTILLEJOS, L.; FERRET, A. Invited Review: Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. **Journal of Dairy Science**, v.90, n.6, p.2580-2595, 2007. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-644>

CANESIN, R.C. **Frequência da suplementação de bovinos da raça Nelore mantidos em pastagens**. 2009. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. 2009.

CARULLA, J.E.; KREUZER, M.; MACHMULLER, A.; HESS, H.D. Supplementation of Acacia mearnsii tannins decreases methanogenesis and urinary nitrogen in forage-fed sheep **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v.56, p.961-970, 2005. <https://doi.org/10.1071/AR05022>

CARDOSO, A.M.; CLEMENTINO, M.B.M.; MARTINS, O.B.; VIEIRA, R.P.; ALMEIDA, R.V.; ALQUERES, S.M.C.; ALMEIDA, W.I. *Archaea*: Potencial Biotecnológico. **Archaea: Potencial Biotecnológico**, n.30, p.71-71, 2003.

CARDOSO, A.S. **Avaliação das emissões de gases de efeito estufa em diferentes cenários de intensificação de uso das pastagens no Brasil**

central. 2012. 84p. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo) - Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

CHAUCHEYRAS, F.; FONTY, G.; BERTIN, G.; GOUET, P. In vitro H₂ utilization by a ruminal acetogenic bacterium cultivated alone or in association with *Archaea Methanogen* is stimulated by a probiotic strain of *Sacharomyces cerevisiae*. **Applied and Environmental Microbiology**, v.61, p.3466-3467, 1995.

CICERONE, R.J., OREMLAND, R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, v.2, n.2, p.299-327, 1988. <https://doi.org/10.1029/GB002i004p00299>

CLAYTON, E.H.; HANSCH, E.J.; HUIJNEN, P.T.A.J.; ROWE, J.B. Controlling methane production with virginiamycin. **Australian Society Animal Production**, v.21, p.239-242, 1996.

COCITO, C. Antibiotics of the virginiamycin family, inhibitors which contain synergistic components. **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v.43, n.2, p.145-198, 1979.

COCITO, C.; DI GIAMBATTISTA, M.; NYSSSEN, E.; VANNUFFEL, P. Inhibition of protein synthesis by streptogramins and related antibiotics. **Journal of Animal Science**, v.77, p.2259-2268, 1999.

CROOY, P.; DE NEYS, R. Virginiamycin: nomenclature. **Journal of Antibiot**, v.25, n.6, p.371-372, 1972. <https://doi.org/10.7164/antibiotics.25.371>

DeSOMER, P.; VAN DIJCK, O. A preliminary report on antibiotic number 899, a streptogramin-like substance. **Antibiot Chemother**, v.5, n.11, p.9-632, 1955.

DiLORENZO, N. Manipulation of the rumen microbial environment to improve performance of beef cattle. In: 22 Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium. **Anais...** Gainesville, Florida, 2011.

DOHME, F.; MACHMÜLLER, A.; WASSERFALLEN, A.; KREUZER, M. Comparative efficiency of various fats rich in medium-chain fatty acids to suppress ruminal methanogenesis as measured with RUSITEC. **Canada Journal Animal Science**, v.80, p.473-482, 2000. <https://doi.org/10.4141/A99-113>

FACIOLA, A.P.; BRODERICK, G.A.; HRISTOV, A.; LEÃO, M.I. Effects of lauric acid on ruminal protozoal numbers and fermentation pattern and milk production in lactating dairy cows. **Journal of Animal Science**, v.91, p.363-373, 2013. <https://doi.org/10.2527/jas.2012-5168>

FIELD J.A.; KORTEKAAS, S.; LETTINGA, G. The tannin theory of methanogenic toxicity. **Biological Wastes**, v.29, p.241–262, 1989. [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90016-5)

FONSECA, M.P. **Consumo, digestibilidade aparente e emissão de metano em novilhos F1 Holandês x Gir suplementados com monensina e/ou virginiamicina**. 2014. 65p. Dissertação (Pós-Graduação em Zootecnia) Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014.

FRANCO, A.L.C.; MIZUBUTI, I. Y.; AZEVÊDO, A.G.; RIBEIRO, E.L.; PEREIRA, E.S.; PEIXOTO, E.L.T.; FERREIRA, M.F.; ANDRADE NETO, A.Q.A. Fermentação ruminal e produção de metano in vitro de dietas contendo torta de algodão. **Semina: Ciências Agrárias**, v.34, n.4, p.1955-1966, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1955>

FREIRI, A.P.A. **Desempenho, características de carcaça, produção de metano e metabolismo ruminal em ovinos alimentados com dieta contendo nitrato de cálcio**. 2015. 114p. Tese (Ciência Animal e Pastagens) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Quieroz”. Piracicaba. 2015.

GOODRICH, R.D.; GARRETT, J.E.; GAST, D.R.; KIRICK, M.A.; LARSON, D.A.; MEISKE, J.C. Influence of monensin on the performance of cattle. **Journal of Animal Science**, v.58, p.1484-1498, 1984. <https://doi.org/10.2527/jas1984.5861484x>

GRAINGER, C.; WILLIAMS, R.; CLARKE, T.; WRIGHT, A.D.; ECKARD, R.J. Supplementation with whole cottonseed causes long-term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet. **Journal of Dairy Science**, v.93, p.2612-2619, 2010. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2888>

GUAN, H.; WITTENBERG, K.M.; OMINSKI, K.H.; KRAUSE, D.O. Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane. **Journal of Animal Science**, v.84, p.1896-1906, 2006. <https://doi.org/10.2527/jas.2005-652>

HRISTOV, A.N.; GRANDEEN, K.L.; ROPP, J.K.; McGUIRE, M.A. Effect of Sodium Laurate on Ruminal Fermentation and Utilization of Ruminal Ammonia Nitrogen for Milk Protein Synthesis in Dairy Cows. **Journal of**

Dairy Science, v.87, p.1820–1831, 2003. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73339-1](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73339-1)

HRISTOV, A.N.; IVAN, M.; McALLISTER, T. A. In vitro effects of individual fatty acids on protozoal numbers and on fermentation products in ruminal fluid from cattle fed a high-concentrate, barley based diet. **Journal of Animal Science**, v.82, p.2693–2704, 2004. <https://doi.org/10.2527/2004.8292693x>

HISTOV, A.N.; OH, J.; FIRKINS, J.L.; DIJKSTRA, J.; KEBREAB, E.; WAGHORN, G.; MAKKAR, H.P.S.; ADESOGAN, A.T.; YANG, W.; LEE, C.; GERBER, P.J.; HENDERSON, B.; TRICARCIO, J.M. Special topics: mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. **Journal of Animal Science**, v.91, p.5045-5069, 2013a. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>

HISTOV, A. N.; OTT, T.; TRICARCIO, J.; ROTZ, A.; WAGHORN, G.; ADESOGAN, A.; DIJKSTRA, J.; MONTES, F.; OH, J.; KEBREAB, E.; OOSTING, S.J.; GERBER, P.J.; HENDERSON, B.; MAKKAR, H.P.S.; FIRKINS, J.L. Special topics: mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of enteric methane mitigation options. **Journal of Animal Science**, v.91, p.5095-5113, 2013b. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6585>

HUNGATE, R.E. **The rumen and its microbes**. New York: Academic Press. 1966, 465p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2001: the scientific basis**. United Kingdom: Cambridge University, 2001. 881p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Cambridge: University Press, 2006. 297p.

JOHNSON, K.A.; JOHNSON, D.E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, v.73, n.8, p.2483-2492, 1995. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>

JOUANY, J.P. Manipulation of microbial activity in the rumen. **Archivos of Animal Nutrition**, v.46, p.133–153, 1994. <https://doi.org/10.1080/17450399409381766>

JOUNIOR PERNA, F.; RODRIGUES, P.H.M.; PINEDO, L.A.; MARINO, C.T.; MARTINS, M.F.; VASQUEZ, D.C.Z. Aditivos alimentares para bovinos

como estratégia para mitigação de metano entérico. In: III Simpósio de Sustentabilidade & Ciência Animal. **Anais...** Pirassununga, 2013.

KNAPP, J.R.; LAUR, G. L.; VADAS, P.A.; WEISS, W.P.; TRICARICO, J.M. Invited review: enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. **Journal of Dairy Science**, v.97, p.3231-3261, 2014. <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234>

KOZLOSKI, G.B. **Bioquímica dos ruminantes**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2002. 139p.

KURIHARA, M.; MAGNER, T.; HUNTER, R.A.; MCCRABB, G.J. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. **British Journal of Nutrition**, v.81, n.3, p.227, 1999.

KUMAR, R.; KAMRA, D.N.; AGARWAL, N.; CHAUDHARY, L.C. In vitro Methanogenesis and fermentation of feeds containing oil seed cakes with rumen liquor of buffalo. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v.20, n.8, p.1196-1200, 2007. <https://doi.org/10.5713/ajas.2007.1196>

LANGE, M.; WESTERMANN, P.; AHRING, B.K. Archaea in protozoa and metazoan. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.48, p.114-118, 2008.

LIMA, M. A. Emissão de gases de efeito estufa provenientes de sistemas agrícolas no Brasil. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, v.3, n.17, p.38-43, 2000.

LIMA, M.A.; LOURENÇO, A.J.; ALLEONI, G.F.; DEMARCHI, J.J.A.A.; MANELLA, M.Q.; FRIGHETTO, R.T.S. **Influência do Manejo da Produção Animal sobre a Emissão de Metano em Bovinos de Corte**. 2007. 44p.

MACHADO, F.S., PEREIRA, L.G.R., GUIMARÃES JÚNIOR, R., LOPES, F.C.F., CHAVES, A.V., CAMPOS, M.M., MORENZ, M.J.F. Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação. **Série Documentos Embrapa**, 2010. 51p.

MACHADO, F.S.; PEREIRA, L.G.R.; GUIMARÃES JÚNIOR, R.; LOPES, F.C.F.; CHAVES, A.V.; CAMPOS, M.M.; MORENZ, M.J.F. **Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação**. Doc. 147, p.1-92, 2011.

MACHMÜLLER, A.; KREUZER, M. Methane suppression by coconut oil and associated effects on nutrient and energy balance in sheep. **Canada Journal Animal Science**, v.79, p.65–72, 1999. <https://doi.org/10.4141/A98-079>

MACHMÜLLER, A.; OSSOWSKI, D.A.; KREUZER, M. Comparative evaluation of the effects of coconut oil, oilseeds and crystalline fat on methane release, digestion and energy balance in lambs. **Animal Feed Science and Technology**, v.85, p.41–60. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(00\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(00)00126-7)

MACIEL, I. C. F.; SATURNINO, H. M.; BARBOSA, F. A.; MAIA FILHO, G. H. B.; COSTA, P. M.; MALACCO, V. M. R. Virginiamicina na alimentação de ruminantes. **Cadernos de Ciências Agrárias**, v.7, n.1, supl. 1, 2015.

MAIA, M.R.G.; CHAUDHARY L.C.; FIGUERES, L.; WALLACE R.J. Metabolism of polyunsaturated fatty acids and their toxicity to the microflora of the rumen. **Antonie Van Leeuwenhoek**, v.91, p.303–314, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10482-006-9118-2>

MARTIN, C.; MORGAVI, D.P.; DOREAU, M. Methane mitigation in ruminants: from microbes to the farm scale. **Animal**, v.4, n.3, p.351-365, 2009. <https://doi.org/10.1017/S1751731109990620>

MATSUMOTO, M.; KOBAYASHI, T.; TAKENAKA, A.; ITABASHI, H. Defaunation effects of medium-chain fatty-acids and their derivatives on goat rumen protozoa. **The Journal of General and Applied Microbiology**, v.37, n.5, p.439–445, 1991. <https://doi.org/10.2323/jgam.37.439>

McALLISTER, T.A.; OKINE, E.K.; MATHISON, G.W.; CHENG, K.J. Dietary, environmental and microbiological aspects of methane production in ruminants. **Canada Journal Animal Science**, v.76, p.231-243, 1996. <https://doi.org/10.4141/cjas96-035>

McGINN, S. M.; BEAUCHEMIN, K. A.; COATES, T.; COLOMBATTO, D. Methane emissions from beef cattle: effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. **Journal of Animal Science**, v.82, p.3346–3356, 2004. <https://doi.org/10.2527/2004.82113346x>

McSWEENEY, C.S.; PALMER, B.; McNEILL, D.M.; KRAUSE, D.O. Microbial interactions with tannins: nutritional consequences for ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v.91, p.83-93, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00232-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00232-2)

MILICH, L. The role of methane in global warming: Where might mitigation strategies be focused? **Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions**, v.9, n.3, p.179-201, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(98\)00037-5](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(98)00037-5)

MILLEN, D.D.; ARRIGONI, M.B.; PACHECO, R.D.L.; BASTOS J.P.S.T.; MARIANI, T.M. Manipulação da fermentação ruminal: saúde animal e qualidade do produto final. **PUBVET**, v.1, n.5, 2007.

MIN, B.R.; BARRY, T.N.; ATTWOOD, G.T.; McNABB, W.C. The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages: a review. **Animal Feed Science and Technology**, v.106, p.3-19, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(03\)00041-5](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00041-5)

MOE, P.W.; TYRREL, H.F. Methane production in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.62, p.1583-1586, 1979. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(79\)83465-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(79)83465-7)

MORAIS, J.A.S.; BERCHIELLI, T.T.; REIS, R.A. **Aditivos**. In: BERCHIELLI, T.T.; PIRES, A.V.; OLIVEIRA, S. G. Nutrição de ruminantes. Jaboticabal: FUNEP, 2006. p. 111-140.

MORGADO, E.S.; EZEQUIEL, J.M.B.; GALZERANO, L.; HOMEM JÚNIOR, A.C. Produção *in vitro* de CH₄ e CO₂ em Líquido Ruminal de Ovinos Alimentados com Dietas Contendo Alto Teor de Amido ou Fibra Solúvel em Detergente Neutro Associado ou Não ao de Óleo de Girassol. **Revista Científica de Produção Animal**, v.14, n.1, p.81-84, 2012. <https://doi.org/10.15528/2176-4158/rcpa.v14n1p81-84>

MOURÃO, R.C.; PANCOTI, C.G.; FERREURA, A.L.; VIVENZA, P.A.D.; VALENTINI, P.V.; BORGES, A.L.C.C.; SILVA, R.R. Aditivos alimentares para vacas leiteiras. **Revista Eletrônica de Nutrição**, v.9, n.5, p.2011-2040, 2012.

MOURTHE, M. H. F.; REIS, R. B.; LADEIRA, M. M.; SOUZA, R. C.; COELHO, S. G.; SATURNINO, H. M. Suplemento múltiplo com ionóforos para novilhos em pasto: consumo, fermentação ruminal e degradabilidade *in situ*. **Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.63, n.1, p.129-135, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-09352011000100020>

MOSS, A.R. **Methane: global warming and production by animals**. Kingston: Chalcombe Publications, 1993. 105p.

MURRAY, R.M.; BRYANT, A.M.; LENG, R.A. Rates of production of methane in the rumen and large intestines of sheep. **British of Journal Nutrition**, v.36, p.1-14, 1976. <https://doi.org/10.1079/BJN19760053>

NAGARAJA, T.G.; NEWBOLD, C.J.; VAN NEVEL, C.J.; DEMEYER, D.I. **Manipulation of ruminal fermentation. The rumen microbial ecosystem**. Edited by P. N. Hobson and C. S. Stewart, Second Edition, p.524-632, 1997.

NAGARAJA, T.G.; CHENGAPPA, M.M. Liver abscesses in feedlot cattle: A review. **Journal of Animal Science**, v.76, p.287-298, 1998. <https://doi.org/10.2527/1998.761287x>

NEVES, M.C. **Produção *in vitro* de metano e análise da diversidade genética da Archaea metanogênicas do rúmen de bovinos**. 2008. 134 p. Tese (Doutorado em Microbiologia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias “Julio de Mesquita Filho”, Universidade Estadual de São Paulo, Jaboticabal. 2008.

NEWBOLD, C.J.; CHAMBERLAIN, D.G. Lipids as rumen-defaunation agents. **Proceedings of the Nutrition Society**, v.47, p.154, 1988.

NICODEMO, M.L.F. **Uso de Aditivos na Dieta de Bovinos de Corte**. 2001. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte. Doc. 106. 2001.

NOLAN, J.R.; HEGARTY, R.S.; HEGARTY, J.; GORWIN, I.R.; WOODGATE, R. Effects of dietary nitrate on fermentation, methane production and digesta kinetics in sheep. **Animal Production Science**, v.50, p.801-806, 2010. <https://doi.org/10.1071/AN09211>

NUSSIO, L.G; CAMPOS, F.P; LIMA, M.L.M. Metabolismos de carboidratos estruturais. In: **Nutrição de ruminantes**. 2 ed. Jaboticabal: SP, cap. 7, p.183- 223. 2006.

ODONGO, N.E.; BAGG, R.; VESSIE, G.; DICK, P.; OR-RASHID, M.M.; HOOK, S.E.; GRAY, J.T.; KEBREAB, E.; FRANCE, J.; MCBRIDE, B.W. Long-term effects of feeding monensin on methane production in lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.90, p.1781-1788, 2007. <https://doi.org/10.3168/jds.2006-708>

OLIVEIRA, V.S.; SANTANA NETO, J. A.; VALENÇA, R. L. Características químicas e fisiológicas da fermentação ruminal de bovinos em pastejo – revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, ano XI, n.20, 2013.

OLIVEIRA, R.C.; IGARASI, M.S. Utilização de óleos essenciais na mitigação da metanogênese. **PUBVET**, v.7, n.6, 2013.

O'MARA, F. Greenhouse Gas Production from Dairying: Reducing Methane Production. **Advances in Dairy Technology**, v.16, p.295-309, 2004.

PATRA, A.K. Enteric methane mitigation technologies for ruminant livestock: a synthesis of current research and future directions. **Environ Monit Assess**, v.184, p.1929–1952, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2090-y>

PEDREIRA, M.S.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M.A.; FRIGHETTO, R.T.; OLIVEIRA, S.G.; BERCHIELLI, T. T. Ruminal methane emission by dairy cattle in southeast Brazil. **Scientia Agricola**, v.66, p.742-750, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600004>

PEREIRA, E.M.O.; EZEQUIEL, J.M.; BIAGIOLI, B.; FEITOSA, J. Determinação *in vitro* do potencial de produção de metano e dióxido de carbono de líquido ruminal proveniente de bovinos de diferentes categorias. **Archivos Latinoamericanos de Produção Animal**, v.14, n.4, p.120-127, 2006.

PEREIRA, L.G.R.; MACHADO, F.S.; GUIMARÃES JR. R.; AZEVÊDO, J.A.G.; CAMPOS, M.M.; TOMICH, T.R. Técnicas de mitigação de gases na produção pecuária. In: II Simpósio Brasileiro de Produção de Ruminantes. **Anais...** Itapetinga, Bahia, 2013.

POSSENTI, R.A.; FRANZOLIN, R.; SCHAMMAS, E.A.; DEMARCHI, J.J.A.A.; FRIGHETTO, R.T.S.; LIMA, M.A. Efeitos de dietas contendo *Leucaena leucocephala* e *Saccharomyces cerevisiae* sobre a fermentação ruminal e a emissão de gás metano em bovinos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.37, n.8, p.1509-1516, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008000800025>

PRIMAVESI, O.; FRIGHETTO, R.T.; PEDREIRA, M.S.; LIMA, M.A.; BERCHIELLI, T.T.; BARBOSA, P.F. Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.277- 283, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000300011>

PUCHALA, R.; MIN, R.B.; GOETSCH, A.L. SAHLU, T. The effect of a condensed tannin-containing forage on methane emission by goats. **Journal of Animal Science**, v.83, p.182-186, 2005. <https://doi.org/10.2527/2005.831182x>

RAMIREZ-RESTREPO, C.A.; BARRY, T.N. Alternative temperate forages containing secondary compounds for improving sustainable productivity in grazing ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v.120, n.3-4, p.179-201, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.01.015>

RICHARDSON, L.F.; RAUN, A.P.; POTTER, E.L.; COOLEY, C.O.; RATHMACHER, R. P. Effect of Monensin on Rumen Fermentation in Vitro and in Vivo. **Journal of Animal Science**, v.43, p.657-664, 1976. <https://doi.org/10.2527/jas1976.433657x>

RIVERA, A.R.; BERCHIELLI, T.T.; MESSANA, J.D.; VELASQUEZ, P.T.; FRANCO, A.V.M.; FERNANDES, L.B. Fermentação ruminal e produção de metano em bovinos alimentados com feno de capim-tifton 85 e concentrado com aditivos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, p.617-624, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000300022>

RUSSEL, J.B.; STROBEL, H.J. Minireview. Effect of ionóforos on ruminal fermentation. **Applied Microbiology**, p.1-6, 1989.

SARVAN, T.S. 2000. **Effect of bromochloromethane on methanogenesis, nutrient utilization and growth rate of lambs.** MVSc Thesis, Indian Veterinary Research Institute, Izatnagar, India.

SCHOFIELD, P.; MBUGUA, D.M.; PELL, A.N. Analysis of condensed tannins: a review. **Animal Feed Science and Technology**, v.91, p.21-40, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(01\)00228-0](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(01)00228-0)

SILVA, F.A.S. **Desempenho, produção de metano entérico, eficiência de utilização da energia, metabolismo proteico muscular e exigências nutricionais de novilhas Holandês × Zebu alimentadas com silagem de milho ou cana-de-açúcar.** 2015. 76p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SILVEIRA, A.M.; VIÉGAS, J.; BAYER, C.; KOZLOSKI, G.V.; CERRUTI, W. G.; MORO, G.; PEREIRA, S.N.; TONIN, T.J.; CARPES, R. P.; DOTTO, L.R.; VARGAS, D.P. Effect of organic acids or monensin-sodium addition on fatty acid production of short chain and methane through the ruminal fermentation “in vitro”. **Semina: Ciências Agrárias**, v.37, n.1, p.439-448, 2016. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2016v37n1p439>

STRADIOTTI JÚNIOR, D.; QUEIRÓZ, A.C.; LANA, R.P.; PACHECO, C.G.; CAMARDELLI, M.M.L.; DETMAN, E.; EIFERT, E.C.; NUNES, P.M.M.; OLIVEIRA, M.V.M. Ação do extrato de própolis sobre a fermentação *in vitro* de deferentes alimentos pela técnica de produção de gases. **Revista**

Brasileira de Zootecnia, v.33, n.4, p.1093-1099, 2004.
<https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000400030>

TIEMANN, T.T.; LASCANO, C.E.; WETTSTEIN, H.R.; MAYER, A.C.; KREUZER, M.; HESS, H.D. Effect of the tropical tannin-rich shrub legumes *Calliandra calothyrsus* and *Flemingia macrophylla* on methane emission and nitrogen and energy balance in growing lambs. **Animal**, v.2, p.790–799, 2008. <https://doi.org/10.1017/S1751731108001791>

ULYATT, M.J.; LASSEY, K.R.; SHELTON, I.D.; WALKER, C.F. Methane emission from dairy cows and wether sheep fed subtropical grass-dominant pastures in midsummer in New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.45, p.227–234, 2002. <https://doi.org/10.1080/00288233.2002.9513513>

UNGERFELD, E.M.; KOHN, R.A.; WALLACE, R.J.; NEWBOLD, C.J. A meta-analysis of fumarate effects on methane production in ruminal batch cultures. **Journal of Animal Science**, v.85, p.2556-2563, 2007. <https://doi.org/10.2527/jas.2006-674>

VALADARES FILHO, S.C.; PINA, D.S. Fermentação Ruminal. In: **Nutrição de Ruminantes**. Jaboticabal: Funep, 2006. 583p.

VAN NEVEL, C.; DEMEYER, D.I. Lipolysis and biohydrogenation of soybean in the rumen in vitro: inhibition by antimicrobials. **Journal of Dairy Science**, v.78, n.2, p.2797-2806, 1995. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(95\)76910-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(95)76910-7)

WATANABE, Y.; SUZUKI, R.; KOIKE, S.; NAGASHIMA, K.; MOCHIZUKI, M.; FORSTER, R.J.; KOBAYASHI, Y. In vitro evaluation of cashew nut shell liquid as a methaneinhibiting and propionate-enhancing agent for ruminants. **Journal of Dairy Science**, v.93, p.5258- 5267, 2010. <https://doi.org/10.3168/jds.2009-2754>

WEIMER, P.J. Manipulating ruminal fermentation: a microbial ecological perspective. **Journal of Animal Science**, v.76, p.3114-3122, 1998. <https://doi.org/10.2527/1998.76123114x>

WOODWARD, S.L.; WAGHORN, G.C.; ULYATT, M.J.; LASSEY, K.R. **Early indications that feeding Lotus will reduce methane emissions from ruminants**. In: Proceeding of New Zealand Society of Animal Production, v.61, p.23, 2001.

WAGHORN, G.C. Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production: progress and challenges.

Animal Feed Science and Technology, v.147, p.116-139, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.09.013>

YADEGHERI, S.; MALECKY, M.; BANADAKY, M.D.; NAVIDSHAD, B. Evaluating in vitro dose-response effects of *Lavandula officinalis* essential oil on rumen fermentation characteristics, methane production and ruminal acidosis. **Veterinary Resch Forum**, v.6, n.4, p.285-293, 2015.

ZINN, R.A. Effect of salinomycin supplementation on characteristics of digestion and feedlot performance of cattle. **Journal of Animal Science**, v.63, p.1996-2004, 1986. <https://doi.org/10.2527/jas1986.6361996x>