

PRODUÇÃO DE RUMINANTES EM SISTEMAS INTEGRADOS

1º Edição



Alan Figueiredo de Oliveira
Lúcio Carlos Gonçalves

FEPE

Capa: Brisa Márcia Rodrigues Sevidanes

Agradecimento à fazenda Canoas (Curvelo-Minas Gerais) pelas imagens cedidas para a capa do livro

Correção ortográfica: Professora Giovanna Spotorno Moreira

O48p Oliveira, Alan Figueiredo de.
Produção de ruminantes em sistemas integrados/ Alan Figueiredo de
Oliveira, Lúcio Carlos Gonçalves. - 1. ed.- Belo Horizonte: FEPE, 2021.

494 p.:il.

Bibliografia: p.: 22 - 493.
ISBN: 978-65-994630-0-6.
Formato: Livro Digital.

1. Agricultura - 2. Alimentos - 3. Agropecuária - 4. Produtos agrícolas - I. Oliveira, Alan Figueiredo de - II. Gonçalves, Lúcio Carlos - III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária - IV. Título.

CDD – 630

Bibliotecária responsável Cristiane Patrícia Gomes – CRB2569

Autores

Alan Figueiredo de Oliveira

Técnico em Zootecnia – IFET Campus Rio Pomba (2011); Médico Veterinário – EV-UFMG (2018); Mestre em Zootecnia (Produção de Ruminantes) – EV-UFMG (2020); Doutorando em Zootecnia (Produção de Ruminantes) – EV-UFMG.

Ângela Maria Quintão Lana

Agrônoma - UFV (1988); Mestre e Doutora em Genética e Melhoramento – UFV (1996); Pós doutorado - University of Florida (2014); Professora Titular da EV-UFMG.

Brisa Márcia Rodrigues Sevidanes

Graduanda em Medicina Veterinária EV-UFMG.

Daniela Aparecida Barroso Siste

Zootecnista – UFV (1997); Mestre em Zootecnia (Nutrição de ruminantes) – EV-UFMG (2001); Doutoranda em Zootecnia (Produção de Ruminantes) – EV-UFMG.

Daniel Ferreira Mello de Oliveira

Médico Veterinário – EV-UFMG (2020); Mestrando em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG.

Diogo Gonzaga Jayme

Médico Veterinário – EV-UFMG (2001); Mestre em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2003); Doutor em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2007); Professor Associado da EV-UFMG.

Frederico Patrus Ananias de Assis Pires

Médico Veterinário – EV-UFMG (2018); Mestre em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2020); Doutorando em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG.

Guilherme Lobato Menezes

Médico Veterinário – PUC-MG (2014); Mestre em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2020); Doutorando em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG.

Gustavo Henrique Silva Camargos

Graduando em Medicina Veterinária EV-UFMG.

João Vitor Araújo Ananias

Graduando em Medicina veterinária - FUNORTE

Lúcio Carlos Gonçalves

Agrônomo - UFV (1974); Mestre em Zootecnia – EV-UFMG (1977); Doutor em Zootecnia – UFV (1987); Professor Titular da EV-UFMG.

Matheus Anchieta Ramirez

Técnico em Agropecuária – CEDAF Campus Florestal (2002); Médico Veterinário – EV-UFMG (2008); Mestre em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2010); Doutor em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2011); Professor Associado da EV-UFMG.

Pamella Grossi de Sousa

Técnica em Zootecnia – IFET Campus Rio Pomba (2013); Zootecnista – IFET Campus Rio Pomba (2018); Mestre em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG (2020) e Doutoranda em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG.

Rafael Araújo de Menezes

Médico Veterinário – EV-UFMG (2018); Mestrando em Zootecnia (Nutrição de Ruminantes) – EV-UFMG.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - SITUAÇÃO ATUAL E DESAFIOS DOS SISTEMAS INTEGRADOS

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **1**

Capítulo 2 - CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS DAS PASTAGENS EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **26**

Capítulo 3 - VALOR NUTRITIVO DAS PASTAGENS EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **49**

Capítulo 4 - UTILIZAÇÃO DE LEGUMINOSAS EM SISTEMAS INTEGRADOS

Guilherme Lobato Menezes; Diogo Gonzaga Jayme; Alan Figueiredo de Oliveira; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes **69**

Capítulo 5 - DESEMPENHO DE GADO DE CORTE EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **93**

Capítulo 6 - DESEMPENHO DE GADO LEITEIRO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO PECUÁRIA-FLORESTA	
<i>Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes</i>	109
<hr/>	
Capítulo 7 – ESTRESSE TÉRMICO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE RUMINANTES EM CLIMA TROPICAL	
<i>Rafael Araújo de Menezes; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves; Alan Figueiredo de Oliveira; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Guilherme Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; Brisa Márcia Rodrigues Sevidanes</i>	130
<hr/>	
Capítulo 8 - DESEMPENHO VEGETAL EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA	
<i>Pamella Grossi de Sousa, Diogo Gonzaga Jayme, Lúcio Carlos Gonçalves, Alan Figueiredo de Oliveira, Rafael Araújo de Menezes, Guilherme Lobato Menezes, Frederico Patrus Ananias de Assis Pires, Matheus Anchieta Ramirez</i>	160
<hr/>	
Capítulo 9 - DESEMPENHO DE BOVINOS EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA	
<i>Pamella Grossi de Sousa, Diogo Gonzaga Jayme, Lúcio Carlos Gonçalves, Alan Figueiredo de Oliveira, Rafael Araújo de Menezes, Guilherme Lobato Menezes, Frederico Patrus Ananias de Assis Pires, Matheus Anchieta Ramirez</i>	182
<hr/>	
Capítulo 10 - CAPACIDADE DE USO DOS SOLOS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO INTEGRADOS	
<i>Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves; Alan Figueiredo de Oliveira; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; Gustavo Henrique Silva Camargos</i>	203

Capítulo 11 - EMISSÃO E PRODUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA PECUÁRIA

Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves; Alan Figueiredo de Oliveira; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; Daniel Ferreira Mello de Oliveira **230**

Capítulo 12 – ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA E OS SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO

Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves; Alan Figueiredo de Oliveira; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; João Vitor Araújo Ananias **256**

Capítulo 13 - ESTOQUES DE CABONO EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS OCUPADOS COM PASTAGEM E LAVOURA

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **291**

Capítulo 14 - ESTOQUES DE CABONO EM AGROFLORESTAS E AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA EM SISTEMAS AGROPECUÁRIOS

Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes **335**

Capítulo 15 - COMO REALIZAR A ANÁLISE ECONÔMICA DE SISTEMAS INTEGRADOS

Guilherme Lobato Menezes; Diogo Gonzaga Jayme; Alan Figueiredo de Oliveira; Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes **361**

Capítulo 16 – PLANEJAMENTO E GESTÃO POR INDICADORES EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO

380

*Guilherme Lobato Menezes; Diogo Gonzaga Jayme; Alan Figueiredo de Oliveira;
Lúcio Carlos Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa;
Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes*

Capítulo 17 - EXTENSÃO RURAL E SUAS CONEXÕES COM OS SISTEMAS INTEGRADOS

396

*Alan Figueiredo de Oliveira; Ângela Maria Quintão Lana; Lúcio Carlos
Gonçalves; Matheus Anchieta Ramirez; Pamella Grossi de Sousa; Frederico Patrus
Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes*

Capítulo 18 - ÓRGÃOS E POLÍTICAS PÚBLICAS SOBRE OS SISTEMAS INTEGRADOS

421

*Rafael Araújo de Menezes; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves;
Alan Figueiredo de Oliveira; Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Guilherme
Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; Brisa Márcia Rodrigues Sevidanes*

Capítulo 19 - OS SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO DIANTE DA EXIGÊNCIA DA SUSTENTABILIDADE

451

*Matheus Anchieta Ramirez; Alan Figueiredo de Oliveira; Daniela Aparecida
Barroso Siste; Lúcio Carlos Gonçalves; Pamella Grossi de Sousa; Frederico
Patrus Ananias de Assis Pires; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato
Menezes*

CAPÍTULO 11

EMISSÃO E PRODUÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA PECUÁRIA

Frederico Patrus Ananias de Assis Pires; Matheus Anchieta Ramirez; Lúcio Carlos Gonçalves; Alan Figueiredo de Oliveira; Rafael Araújo de Menezes; Guilherme Lobato Menezes; Pamella Grossi de Sousa; Daniel Ferreira Mello de Oliveira

RESUMO

O setor pecuário possui grande responsabilidade sobre a segurança alimentar do planeta. Esse setor também tem sido relacionado aos impactos ambientais causados pelas emissões dos gases causadores do efeito estufa (GEE), como o metano (CH₄). Contudo, sabe-se que existem diversos equívocos nesse sentido e incompreensões quanto à formação dos principais GEE no setor. Os principais GEE produzidos pelo setor pecuário são o CH₄ e o óxido nitroso (N₂O). O CH₄ entérico é produzido pelos microrganismos do domínio *Archaea*, com o uso do hidrogênio (H₂) e do gás carbônico (CO₂) e resulta em perdas de energia para o ruminante. A espécie animal, o estágio fisiológico e a composição da dieta interferem diretamente neste processo. O N₂O é produzido pelo metabolismo microbiano de utilização do nitrogênio e a principal etapa responsável por essa produção é a desnitrificação. Ressalta-se que a produção do N₂O ocorre por uma complexa interação entre as propriedades físico-químicas do solo, os microrganismos, os fatores climáticos e as práticas de manejo. Apesar da relevante participação do setor pecuário nas emissões de GEE, deve-se considerar a importância dos produtos de origem animal e o elevado potencial de mitigação. A compreensão dos processos relacionados à formação dos gases de efeito estufa é fundamental para reduzir os impactos climáticos causados pela pecuária.

INTRODUÇÃO

As projeções realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2019) apontam que a população mundial deve atingir a marca de 10 bilhões de habitantes até o ano de 2050. Esse valor representa um aumento de 26% comparado aos atuais 7,7 bilhões. Com o crescimento populacional, também deverá aumentar a demanda por alimentos, principalmente os de elevada densidade nutricional, como os de origem animal. A maior parte do consumo adicional de alimentos será em regiões específicas (África Subsaariana e Índia), onde a população deve dobrar de tamanho nos próximos 30 anos (Organização

das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO, 2018; ONU, 2019). Nos países emergentes e desenvolvidos, também ocorrerá um aumento da demanda, porém deverá ser menos acentuado, com maior consumo de alimentos por habitante (per capita) devido ao aumento do poder aquisitivo (FAO, 2018).

No Brasil, a produção de carne deve expandir-se em 19% para atender ao forte crescimento da demanda global e regional até o ano de 2027 (FAO, 2018). O país se destaca no cenário internacional como um grande produtor de alimentos e pela força no setor agropecuário. Conforme o levantamento do Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA (2020), em 2019 o PIB do agronegócio brasileiro representou 21,4% do PIB total do país. O grande destaque do setor foi o ramo pecuário, que cresceu expressivos 23,71% nesse período (CEPEA, 2020). Além do constante crescimento, o país possui o maior rebanho bovino comercial do mundo, é o maior exportador de carne bovina (ABIEC, 2020) e o quinto maior produtor de leite (FAO 2019). Portanto, considera-se que a pecuária nacional tem grande responsabilidade sobre a segurança alimentar mundial.

Apesar da sua importância, a atividade pecuária é apontada como uma das causadoras de mudanças climáticas globais devido aos impactos ambientais gerados. Esses aspectos estão relacionados à emissão de gases do efeito estufa (GEE), que resultam no aquecimento do planeta em médio e em longo prazo. Entretanto, essa condição ocorre de maneira distinta no Brasil e no mundo, e existem diversos equívocos nesse sentido. Além disso, observa-se incompreensões quanto à formação dos principais GEE no setor pecuário. Objetivou-se neste capítulo discutir os principais aspectos relacionados à produção e à emissão de GEE pela pecuária.

EFEITO ESTUFA E EMISSÕES MUNDIAIS

O intenso desenvolvimento da humanidade nos últimos séculos é apontado como causador de diversos impactos ambientais relacionados com o fenômeno do aquecimento global. Estimativas do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (2018) e da *National Aeronautics and Space Administration* – NASA (2020) indicam que, desde o período pré-industrial, houve um aumento médio de 1,0 °C na temperatura média do planeta. Esse aquecimento é consistente, e os anos de 2014 a 2019, últimos cinco anos desses levantamentos, foram os mais quentes dos últimos 140 anos (quando se iniciou o monitoramento). Além disso, nas últimas décadas, houve um aumento na frequência de eventos extremos de calor e de estiagem com uma diminuição dos períodos de frio

(Peterson *et al.*, 2013; Oswald e Rood, 2014). Se o ritmo de elevação das temperaturas se mantiver, é provável que o aquecimento global seja de até 1,5 °C entre 2030 e 2052 (IPCC, 2018) e de até 5,8 °C no ano de 2100, em projeções com cenários menos favoráveis (IPCC, 2007).

O agravamento do aquecimento global tem como principal causa o aumento das emissões de GEE. O efeito estufa é um fenômeno natural, responsável por manter as temperaturas médias do planeta em faixas adequadas ao desenvolvimento da vida. Esse fenômeno ocorre por meio da interação atmosférica com a energia solar infravermelha irradiada ao planeta (Schneider, 1989). Essa energia, quando chega à superfície, pode ser absorvida ou refletida diretamente de volta ao espaço. Porém, parte da energia refletida é bloqueada pela presença dos GEE na atmosfera. Esses gases são opacos à radiação terrestre, pois essa radiação apresenta maiores comprimentos de onda em relação à energia irradiada diretamente pelo sol. Portanto, todo o processo resulta em retenção de calor no planeta. Nesse sentido, se não houvesse a presença dos GEE na atmosfera, a temperatura média do planeta seria muito abaixo da atual (14 °C), na ordem de -18°C.

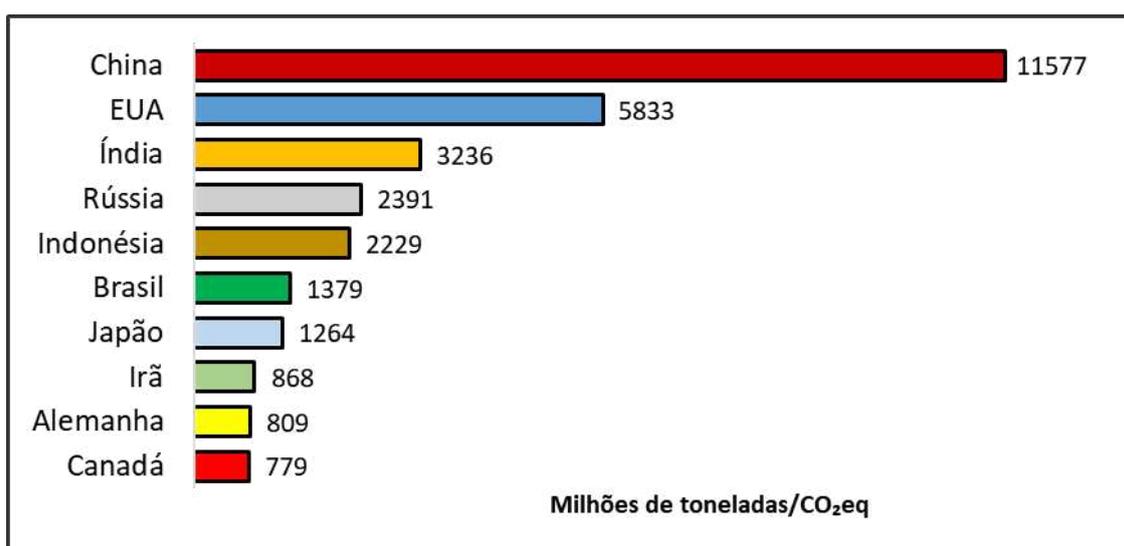
Os principais GEE são o gás carbônico (CO₂), o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄). Outros gases como os clorofluorcarbonetos (CFCs), os hidrofluorcarbonetos (HFCs), os perfluorcarbonetos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF₆) também são classificados como GEE, porém apresentam baixas participações nas emissões mundiais (IPCC, 2019). O CO₂ é o gás de referência utilizado para quantificar as emissões e, para fins de comparação, todos os outros GEE são convertidos em equivalentes de CO₂ (CO₂ eq.). O metano é 21 vezes mais potente do que o CO₂ como potencial causador do aquecimento global e o N₂O, 265 vezes (IPCC, 2019).

Um pequeno número de países contribui com a maior parte das emissões mundiais de GEE. Calcula-se que os 10 maiores emissores respondam por mais de 68% da produção global anual de CO₂ eq. (UNFCCC, 2017). Esses 10 países são importantes para a economia do planeta e, juntos, representam mais de 50% da população global e quase 60% do PIB mundial. A China é o maior produtor de CO₂ eq., com 26% das emissões, seguida pelos Estados Unidos (13%) e pela Índia (6,7%). O Brasil é o sexto maior emissor e é responsável por 3,1% das emissões mundiais de GEE (Figura 1).

Para maior precisão de comparação dos impactos causados por cada país, utilizam-se os dados de emissões por pessoa (per capita). Geralmente, os 10 maiores emissores apresentam emissões por pessoa maiores do que a média mundial, (cerca de 6,8 tCO₂ eq. por pessoa) (UNFCCC, 2017). Entre esses países, os EUA apresentam as

maiores emissões per capita, com 22 tCO₂ eq., seguidos pelo Canadá, com 18 tCO₂ eq. por pessoa. A Índia é uma exceção nesse contexto, uma vez que possui o menor nível de emissão per capita do planeta, com 2,4 tCO₂ eq. por pessoa. Além disso, alguns países com pequenas emissões totais apresentam elevadas emissões per capita, muitas vezes superiores a países presentes na lista dos 10 maiores. Esse aspecto ocorre em nações menos populosas, porém economicamente desenvolvidas, como o Qatar (34,8 tCO₂ eq./pessoa) e a Austrália (21,5 tCO₂ eq./pessoa). No Brasil, as emissões per capita estão acima da média mundial e correspondem a 9,3 tCO₂ eq. (SEEG, 2019).

Figura 1. Emissões por países em milhões de toneladas de CO₂ eq. em 2016



Fonte: Adaptado de UNFCCC, 2017 e PIK, 2017.

A política climática internacional das Nações Unidas desenvolve ações para limitar o avanço do aquecimento global. Nesse sentido, em 2015, houve a 21ª Conferência das Partes da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima para adoção do Acordo de Paris. Nessa conferência, foi apresentado o Acordo de Paris (UNFCCC, 2015), que, até no ano de 2017, havia sido assinado por 195 países. Esse acordo consiste em diversos objetivos a serem atingidos pelas nações para evitar que o aquecimento global chegue aos 2 °C no final do século, com uma meta ideal de 1,5 °C.

Após o Acordo de Paris, diversas projeções foram realizadas com o objetivo de quantificar os impactos globais dos aumentos de 1,5 °C ou 2 °C na temperatura média da Terra em relação ao período pré-industrial. Os principais impactos apontados são: aumento dos episódios de ondas de calor extremas, maior ocorrência de chuvas intensas, aumento dos eventos de estiagem ou irregularidade pluviométrica e aumentos no nível do

mar (IPCC, 2018). Segundo Selten *et al.* (2020), projeções com aumentos da temperatura em longo prazo, maiores ou iguais a 2 °C, possuem grande impacto potencial sobre a saúde, a agricultura e a gestão da água mundial. Além disso, em países de clima temperado, os impactos negativos, como mortalidade por ondas de calor e a disseminação de doenças, serão intensificados e mais frequentes nos períodos de verão (Patz *et al.*, 2005; Egan e Mullin, 2016).

No Brasil central, o aumento das temperaturas médias deve ter grande impacto no setor agropecuário. O principal deles é o aumento da frequência e da intensidade dos episódios de estiagem (IPCC, 2018). Na pecuária, essa condição deve aumentar a sazonalidade da produção forrageira (Pezzopane, 2019), o que pode reduzir os índices zootécnicos e aumentar os custos de produção. Apesar de ser diretamente atingido, esse setor também contribui para o processo de aquecimento global pelas elevadas emissões de GEE. De acordo com Gerber *et al.* (2013), o setor pecuário mundial é responsável por 14,5% das emissões totais de CO₂ eq..

EMISSÕES NO SETOR PECUÁRIO

Os impactos climáticos das atividades pecuárias têm incentivado a população a reduzir o consumo de produtos de origem animal como forma de diminuir as emissões globais de GEE. Entretanto, os produtos de origem animal são reconhecidos pela importância para a saúde humana (Naik *et al.*, 2013; Potdar *et al.*, 2014; Green *et al.*, 2017; Lemoine *et al.*, 2020) e pela elevada concentração de macro e micronutrientes (Naik *et al.*, 2013). Desse modo, ao comparar diferentes alimentos quanto aos impactos ambientais gerados, é importante considerar a capacidade que cada um possui de suprir a demanda nutricional humana.

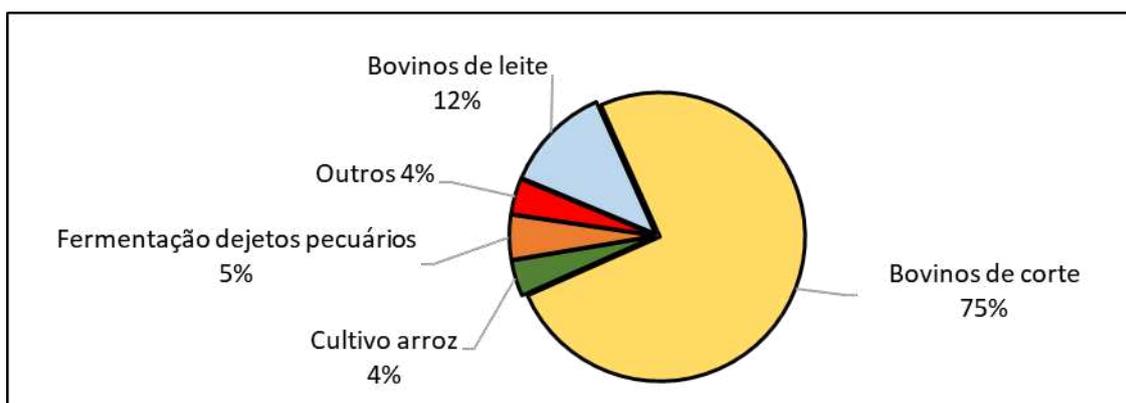
Smedman *et al.* (2010) compararam as emissões de GEE geradas para a produção de leite em relação a outras bebidas, como: refrigerantes, suco de laranja, cerveja, vinho, água mineral gasosa e bebidas de soja e de aveia. O leite apresentou maior emissão absoluta de CO₂ eq. para produção de cada unidade do produto, porém apresentou maior densidade de nutrientes em relação às emissões de GEE entre os itens comparados. Ou seja, o elevado valor nutricional do leite determinou uma menor emissão por unidade de nutriente disponível. Com o uso dessa medida, as emissões para a produção de leite foram duas vezes menores do que para a bebida de soja, por exemplo. Esses resultados constituem importantes argumentos contra barreiras criadas contra os produtos de origem

animal e que podem, eventualmente, prejudicar a pecuária nacional (Machado *et al.*, 2011).

A diversidade de alimentos produzidos pela pecuária é grande devido ao elevado número de espécies de animais contidas nesse setor. Para comparar os impactos ambientais gerados por espécie, a FAO (2017) realizou estimativas das emissões de CO₂ eq. por kg de proteína produzida pelos principais produtos pecuários. A carne de búfalo tem maior intensidade de emissão (kg de CO₂ eq./kg de proteína), com uma média de 404 kg de CO₂ eq./kg de proteína, seguida da carne bovina, com uma média de 295 kg de CO₂ eq./kg de proteína. Logo depois, estão a carne e o leite de pequenos ruminantes e o leite de búfala, com valores intermediários de CO₂ eq./kg de proteína. O leite de vaca, a carne de frango, os ovos e a carne de porco apresentam baixas intensidades de emissão, com menos de 100 kg de CO₂ eq./kg de proteína. Portanto, observa-se que os ruminantes são importantes emissores e que há grandes diferenças nas intensidades de emissão, conforme o produto formado. Apesar dos números elevados, considera-se que esse grupo é o que possui maior potencial de mitigação (FAO, 2017).

O principal gás do efeito estufa emitido pelos ruminantes é o CH₄. Cerca de 90% desse gás é produzido no rúmen (metano entérico) pela fermentação anaeróbica dos alimentos e representa 87% do total de CH₄ que é emitido pelas atividades agropecuárias no país. Esse valor corresponde ao somatório emitido pela bovinocultura de corte (75%) e pela bovinocultura leiteira (12%). Os 13% restantes são produzidos pela fermentação anaeróbica da matéria orgânica da produção de arroz em terrenos alagados e de dejetos de outros subsetores da pecuária (Figura 2) (MCTIC, 2017).

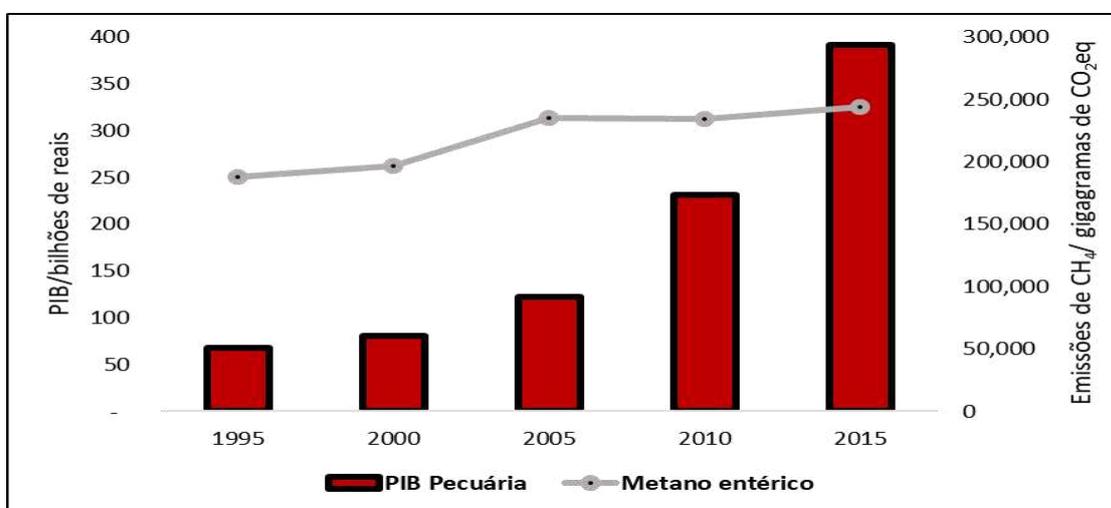
Figura 2. Proporção das emissões de CH₄ pelos subsetores da agropecuária brasileira



Fonte: Adaptado de MCTIC (2017).

Entre os anos 1995 e 2015, a emissão de CH₄ entérico aumentou em 30% no país (MCTIC, 2017). Nesse período, foram observadas taxas de crescimento similares no rebanho bovino nacional, com 33% de aumento (de 161 milhões para 214 milhões de cabeças) (IBGE, 2018). Entretanto, o PIB do ramo pecuário teve um comportamento distinto. O crescimento desse indicador ocorreu em um ritmo mais acelerado e aumentou em quase seis vezes (477%) nesse período, com um aumento total de R\$ 324 bilhões no faturamento médio anual (CEPEA, 2020). Além disso, nos anos seguintes, o faturamento da atividade continuou em franco crescimento e chegou a R\$ 494,7 bilhões em 2019 (CEPEA, 2020). Já o rebanho bovino nacional manteve-se estável, com cerca de 214 milhões de cabeças em 2019 (ABIEC, 2020). Essa diferença de crescimento entre o PIB da pecuária e as emissões totais de CH₄ entérico pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3. Emissão de CH₄ entérico em gigagramas* de CO₂ eq. e PIB da pecuária em bilhões de reais entre os anos 1995 e 2015

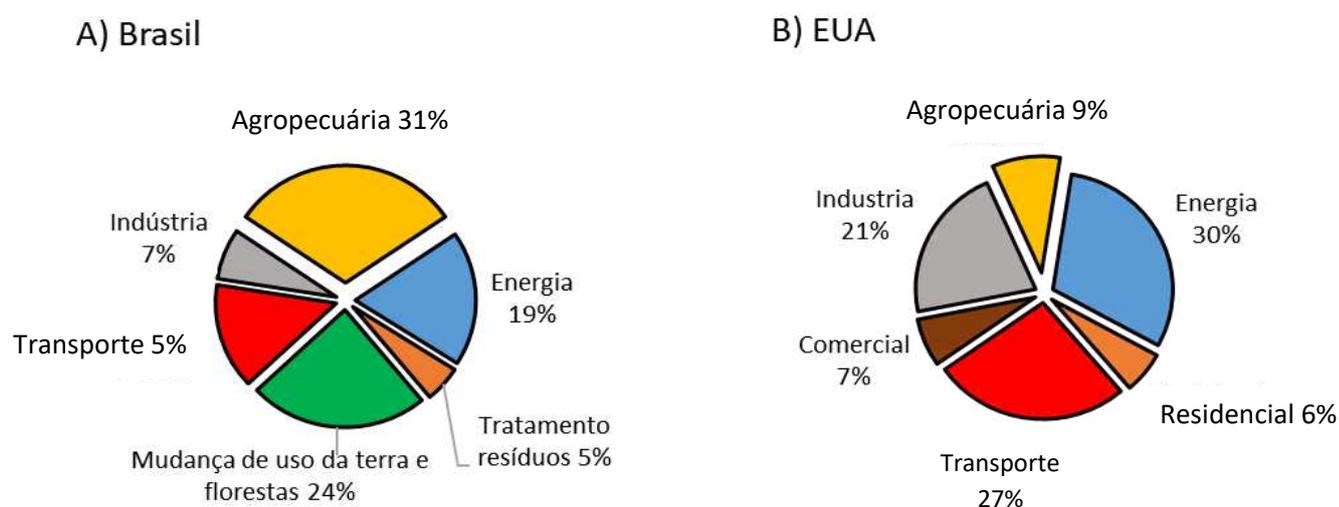


* 1 gigagrama corresponde a 1000 toneladas. Fonte: Adaptado de CEPEA (2020) e MCTIC (2017).

Essas informações, analisadas em conjunto, demonstram que é possível aumentar a produtividade com menor produção relativa de GEE e evidenciam o aumento da eficiência dos sistemas produtivos nacionais (Almeida *et al.*, 2018). Diversos estudos ressaltam a maior eficiência produtiva como uma importante estratégia para a redução dos impactos climáticos produzidos pela pecuária (Cardoso *et al.*, 2016). O principal resultado do aumento da eficiência produtiva é a redução da intensidade de emissão de CH₄ (FAO, 2020).

Aproximadamente 14,1% do total de CO₂ eq. emitidos no país referem-se ao CH₄ produzido pela fermentação entérica dos bovinos (calculados com dados do MCTIC, 2017) (57% do total emitido pelo setor agropecuário). Esses valores são diferentes da média global e dos observados em outros países. Mundialmente, as emissões de CH₄ entérico pelos bovinos representam 5,7% do total de CO₂ eq. emitidos (Gerber *et al.*, 2013) e, nos EUA, correspondem a 2,5% (U.S. Environmental Protection Agency - Usepa, 2017). Essa diferença proporcional deve-se à maior participação relativa de outros setores no somatório total de emissões nacionais. No Brasil, o setor agropecuário tem maior participação nas atividades econômicas, e a maior parte da produção de energia é renovável. Além disso, em comparação direta com os EUA, no Brasil os setores industriais e de transportes apresentam menor relevância na produção total de GEE (MCTIC, 2017) (Figura 4). É importante ressaltar que alguns itens que foram quantificados no setor de energia no levantamento brasileiro (MCTIC, 2017) foram considerados como parte do setor industrial no levantamento norte-americano (Usepa, 2017). Contudo, esse fato não prejudica a visualização da diferença proporcional das emissões por setor da economia, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4. Participação nas emissões líquidas por setor da economia no Brasil (A) e nos EUA (B)



Fonte: Adaptado de MCTIC (2017) e Usepa (2017).

Apesar dessa diferença, quando se comparam as emissões totais pelo setor agropecuário, os números norte-americanos são 45% maiores que os brasileiros (calculados com dados de Usepa, 2017 e PIK, 2017). Contudo, no Brasil ainda ocorre maior emissão quantitativa de GEE/kg de produto (IPCC, 2019), levando-se em consideração apenas os bovinos. Esse aspecto é atribuído aos baixos índices zootécnicos e à menor eficiência dos sistemas produtivos nacionais, apesar da evolução observada nas últimas décadas.

O segundo gás com maiores níveis de emissão pelas atividades agropecuárias é o N_2O , e corresponde a 36% das emissões totais pelo setor no Brasil. O N_2O é produzido principalmente em reações de desnitrificação e mineralização da matéria orgânica nos solos agrícolas (Bayer *et al.*, 2015). Por isso, mais de 90% das emissões nacionais desse gás são gerados no setor agropecuário (MCTIC, 2017).

As emissões de N_2O podem ser classificadas como diretas ou indiretas (MCTIC, 2017). As emissões diretas relacionam-se ao uso de adubos e fertilizantes e à mineralização de resíduos agrícolas da matéria orgânica nos solos. Já as emissões indiretas representam a porção de nitrogênio adicionado aos solos como fertilizantes e esterco, a qual é volatilizada como amônia (NH_3) e óxido nítrico (NO), além da fração perdida por lixiviação. Por fim, devem ser reportadas como emissões diretas e indiretas aquelas provenientes da deposição de excretas (fezes e urina) de animais em pastagens. Esse item representa 34% do total de N_2O emitido pelo setor agropecuário nacional (MCTIC, 2017). Dessa forma, a pecuária assume importante papel nas emissões de N_2O nacionais.

Os padrões proporcionais de CH_4 e N_2O emitidos no país evidenciam que a pecuária – especialmente os bovinos – representa um ponto crítico para a redução das emissões de GEE. Essa condição pode ser explicada por alguns aspectos intrínsecos dos bovinos, como sistema digestivo, forma de criação e importância para a economia nacional. Portanto, considera-se relevante caracterizar os processos digestivos e físico-químicos relacionados com a formação do metano entérico e do óxido nítrico pelos bovinos em pastagens.

FORMAÇÃO DO METANO ENTÉRICO

O metano é uma molécula orgânica do grupo dos hidrocarbonetos formada por ligações covalentes entre um átomo de carbono e quatro átomos de hidrogênio. No rúmen, esse gás é produzido pela atividade de microrganismos do domínio *Archaea* pertencentes

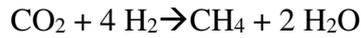
ao filo *Euryarchaeota*. Esses microrganismos possuem genoma distinto e não podem ser classificados como bactérias nem como fungos (*Eukarya*) (Budlle *et al.*, 2011; Poulsen *et al.*, 2013). A principal característica das *Archaea* metanogênicas é a presença de complexos enzimáticos específicos, especialmente o metil-coenzima M redutase (Mcr), que catalisa a etapa terminal da produção de metano (Thauer *et al.*, 2011)

Diversas linhagens distintas pertencentes ao domínio *Archaea* são encontradas no ambiente ruminal. As linhagens predominantes são as que usam o hidrogênio em seu metabolismo, e, conforme Henderson *et al.* (2015), o *Methanobrevibacter gottschalkii* e o *Methanobrevibacter ruminantium* compreendem 74% dessa comunidade metanogênica do rúmen. Esses organismos, referidos como “hidrogeniotróficos”, usam hidrogênio molecular (H_2) para reduzir o CO_2 em metano por meio do ciclo de Wolfe (Thauer, 2012). Porém, pode haver variações proporcionais na composição das comunidades metanogênicas de acordo com a dieta e a espécie do ruminante hospedeiro (Hook *et al.*, 2010). Além disso, existem linhagens que usam formato, acetato, compostos de metila e etanol como substratos para obtenção de energia no rúmen, mas geralmente usam o H_2 em conjunto (Lambie *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016).

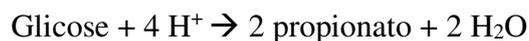
A atividade metanogênica leva à perda de energia pelos animais, variando de 2 a 12% do total consumido (Johnson e Johnson, 1995). Esses valores correlacionam-se com a digestibilidade do alimento ingerido, em que quanto maior a digestibilidade, menor a perda de energia (Benouda *et al.*, 2019). Além disso, a espécie animal, o estágio fisiológico e a composição da dieta também interferem nesses valores (Pedreira *et al.*, 2009).

Apesar de a perda de energia representar um custo para o pecuarista e para o meio ambiente, a metanogênese é importante para os ruminates. Essa condição é responsável pela remoção contínua de H_2 do ambiente ruminal, visto que os microrganismos do grupo *Archaea* usam esse gás como fonte de energia (Hungate, 1966). Menores concentrações de H_2 possibilitam que os sistemas enzimáticos relacionados aos processos oxidativos da fermentação (reoxidação de cofatores reduzidos via enzimas desidrogenases) funcionem adequadamente. Portanto, a atividade metanogênica possibilita uma atividade microbiana eficiente no rúmen (Wolin, 1979).

A reação química simplificada que representa o ciclo da formação do metano no rúmen (ciclo de Wolfe, Thauer, 2012) envolve a captação de uma molécula de CO_2 e quatro de H_2 :



Assim, considera-se a manipulação da produção de H_2 no rúmen como o ponto-chave para controlar a emissão de metano (Joblin, 1999). A liberação desse gás é determinada pelas concentrações e pelas proporções relativas de acetato, propionato e butirato (ácidos graxos voláteis – AGVs) formados no rúmen (Owens e Goetsch, 1988). A produção desses AGVs é alterada pelo tipo de nutriente usado como substrato fermentativo. A fermentação dos carboidratos fibrosos (FDN), como a celulose e as hemiceluloses, resulta em maiores proporções de acetato, butirato e H_2 , o que favorece a atividade metanogênica. Por outro lado, a fermentação dos carboidratos não fibrosos (CNFs), como o amido, resulta em maior produção relativa de propionato. A fermentação propiônica ocorre por uma via competitiva de utilização de H_2 , conforme a equação simplificada demonstrada por Van Soest (1994):



Portanto, a composição da dieta interfere diretamente na disponibilidade de substrato (H_2) para a atividade metanogênica. Além da influência direta sobre o perfil de AGVs formados, a dieta pode interferir na atividade das *Archaea* metanogênicas indiretamente. Essa situação ocorre, por exemplo, quando se utiliza uma elevada proporção de CNFs, cujo processo fermentivo resulta em grande quantidade de ácidos (AGVs e lactato) produzidos em um curto período de tempo. Tal condição reduz a atividade das metanogênicas, pois esse grupo reduz o seu metabolismo e a sua multiplicação quando há redução do pH ruminal.

A forma física (tamanho de partícula) e a digestibilidade total dos alimentos também podem alterar a produção de CH_4 entérico. Esses aspectos estão relacionados ao aumento da taxa de passagem dos alimentos pelo rúmen. Geralmente, quanto maior a taxa de passagem, menor a produção de metano. Essa relação ocorre porque grande parte das *Archaea* metanogênicas encontram-se aderidas às partículas de alimentos ou aos protozoários ciliados. Assim, quando a taxa de renovação do conteúdo é elevada, uma maior proporção desses microrganismos é também levada para os outros compartimentos do sistema digestivo. Além disso, esses microrganismos possuem baixa velocidade de

multiplicação em relação aos demais microrganismos ruminais e não conseguem compensar as perdas pela renovação do conteúdo. Logo, o balanço final da população dos microrganismos metanogênicos no rúmen fica desfavorável (Machado *et al.*, 2011).

Dietas com elevada digestibilidade podem aumentar o nível de consumo de matéria seca (CMS) e também a produção total de CH₄. Esse processo ocorre devido à maior quantidade e extensão de fermentação dos alimentos no rúmen (Liu *et al.*, 2017). Conforme Moorby *et al.* (2015), o consumo de matéria seca tem correlação alta e positiva com a produção de metano entérico. Porém, os incrementos no desempenho dos animais reduzem a proporção de CH₄ emitido por unidade de produto (carne ou leite). Esse aspecto será aprofundado no capítulo “Estratégias de mitigação da produção de gases do efeito estufa e os sistemas de integração”.

Aproximadamente 30% das *Archaea* metanogênicas encontram-se aderidas à superfície dos protozoários ciliados, numa relação de simbiose, a qual é referida como transferência de H₂ interespecífica, em que o H₂ produzido pelo metabolismo final dos protozoários é aproveitado como fonte de energia pelas *Archaea* metanogênicas. Tal relação colabora para o bom funcionamento dos sistemas enzimáticos dos protozoários (Morgavi *et al.*, 2010). Dessa forma, uma possível estratégia para reduzir a produção de CH₄ entérico consiste em diminuir a população dos protozoários (Nguyen *et al.*, 2016). Porém, essa estratégia, assim como outros métodos que diminuem diretamente a população das *Archaea* metanogênicas, pode ser prejudicial ao processo fermentativo ruminal, devido ao acúmulo de H₂ no rúmen. Elevadas concentrações de H₂ reduzem a atividade microbiana, principalmente das bactérias fibrolíticas, em um mecanismo de autorregulação para reduzir a produção desse gás (Janssen, 2010). Portanto, os métodos que diminuem a população das *Archaea* devem buscar outras formas de remover o H₂ produzido no rúmen.

A redução da disponibilidade de H₂ no rúmen também pode ocorrer pela estimulação de vias que utilizam esse gás para produtos alternativos. Embora estudos adicionais sejam necessários, existem evidências crescentes de que o redirecionamento do fluxo de H₂ pode favorecer a produção animal, com a recuperação de energia que, de outra forma, seria perdida pelas emissões de metano (Henderson *et al.*, 2018). A maioria das atenções se concentrou em microrganismos acetogênicos, que promovem a conversão de H₂ / CO₂ em acetato usando [FeFe]-hidrogenases (Schuchmann, 2014). Nesse sentido, a suplementação com probióticos acetogênicos tem sido estudada como

uma possível forma de reduzir a metanogênese. Entretanto, esses estudos ainda são considerados insuficientes ou inconclusivos (Pereira *et al.*, 2015).

Segundo Greenig (2019), existem evidências de que microrganismos “hidrogeniotróficos” alternativos, incluindo bactérias acetogênicas e respiratórias, podem prosperar no rúmen e competir efetivamente com os essencialmente metanogênicos pelo H_2 . Esses autores demonstraram que dois terços dos genomas presentes no microbioma do rúmen codificam enzimas que catalisam o consumo de H_2 , incluindo 26 subgrupos de hidrogenases distintos. Dessa forma, uma solução pode ser a suplementação com aceptores de elétrons, como fumarato, nitrato ou sulfato, que estimulam os microrganismos hidrogeniotróficos respiratórios dominantes. Essas abordagens mostraram bons resultados na mitigação da produção de metano *in vitro* (Asanuma *et al.*, 1999; Patra *et al.*, 2014) e em ensaios de campo (Hulshof *et al.*, 2012). Contudo, em relação ao uso do nitrato especificamente, o nitrito formado no processo de redução do nitrato até a amônia pode prejudicar a atividade microbiana no rúmen (Van Zijderveld *et al.*, 2010).

Conforme Pereira *et al.* (2015), em resumo, a redução da emissão de metano pela manipulação do metabolismo de H_2 no rúmen deve basear-se nos seguintes objetivos (usados em conjunto ou isoladamente).

1. Reduzir a produção de H_2 sem prejudicar a digestão dos alimentos.
2. Aumentar a utilização do H_2 por vias de produção de produtos alternativos.
3. Inibir as *Archaea* metanogênicas (número e/ou atividade), com estímulo concomitante de vias que consomem H_2 .

A aplicação prática de estratégias que alteram o metabolismo de H_2 ruminal será aprofundada no capítulo “Estratégias de mitigação das emissões de gases do efeito estufa e os sistemas de integração”. Nesse capítulo, outras estratégias que envolvem melhorias na eficiência produtiva dos sistemas e dos aspectos nutricionais dos animais também serão amplamente discutidas e aprofundadas.

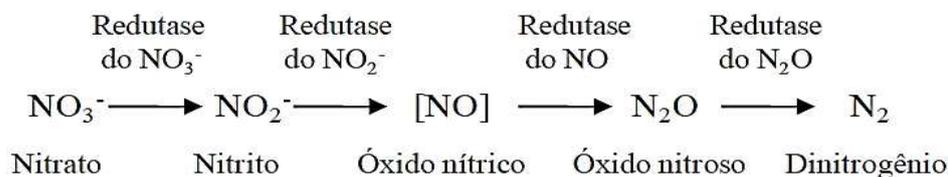
FORMAÇÃO DO ÓXIDO NITROSO

O óxido nitroso é um composto inorgânico, classificado como um óxido neutro, produzido naturalmente no meio ambiente pelo metabolismo microbiano de utilização do nitrogênio (N). Tal processo, referido como ciclo do nitrogênio, é influenciado pelas atividades humanas, principalmente as agropecuárias, e tem levado a aumentos nas

emissões anuais de N₂O para a atmosfera. Esse gás é um importante intensificador do efeito estufa, com uma meia-vida de aproximadamente 131 anos na atmosfera (Hartmann *et al.*, 2013). Além disso, o N₂O é relacionado à destruição da camada de ozônio e também à redução da eficiência da adubação nitrogenada em sistemas agropecuários. Estima-se que de 3 a 5% do N usado como fertilizante agrícola é convertido em óxido nitroso (Davidson, 2009)

Didaticamente, o ciclo do nitrogênio é dividido em seis etapas: 1- fixação e 2- amonificação: fixação de uma molécula de N₂ atmosférico como amônia (NH₃) no solo ou em ambientes alagados; 3- nitrificação: transformação da NH₃ em nitrito (HNO₂) e posteriormente em nitrato (HNO₃) 4- assimilação: transformação do HNO₃ em NH₃ e assimilação como nitrogênio orgânico (biomassa vegetal). As outras duas etapas do ciclo consistem na formação do N₂ atmosférico pelo processo de: 5- desnitrificação: conversão do HNO₃ em N₂; ou 6- oxidação anaeróbica de amônio (Anammox): formação de N₂ pela fermentação anaeróbica do HNO₂.

A principal etapa que resulta na formação do N₂O é a de desnitrificação. Essa etapa consiste em um processo que ocorre, quase sempre, na ausência de O₂. Também representa uma reação de oxirredução, na qual óxidos de nitrogênio servem como receptores finais de elétrons, e a matéria orgânica como agente oxidante (Hayatsu, 2008). Embora a desnitrificação completa resulte em perda de N nos sistemas de produção, essa etapa é considerada importante, pois é o principal processo de retorno do N do solo à atmosfera (Liu *et al.*, 2007). As etapas detalhadas da desnitrificação são resumidas conforme seguinte esquema (Milagres, 2014):



Esse processo resulta na mineralização da matéria orgânica e pode ser representado em uma única reação química, considerando-se o carbono (glicose) como fonte de energia:



Logo, o óxido nitroso é um intermediário do processo de desnitrificação, mediado por enzimas redutases. Porém, nem todo óxido nitroso produzido é totalmente reduzido

até o gás N₂ (desnitrificação incompleta). Esse processo ocorre pela incapacidade fisiológica dos microrganismos em transformar todo o NO disponível ou por fatores ambientais que suprimem a reação (Firestone *et al.*, 1980; Graf *et al.*, 2014). Com isso, a redução microbiana de NO é a principal fonte de N₂O para a atmosfera (Hallin *et al.*, 2017).

As óxido nítrico redutases (NOR) são enzimas usadas para desintoxicação ou respiração microbiana a partir do óxido nítrico e pertencem a um grupo diverso de flavoproteínas, *copper oxidases*, entre outras (Kuypers *et al.*, 2018). Essas enzimas estão presentes em diversos tipos de microrganismos, como as *Archaea* e as bactérias. As principais bactérias envolvidas no processo de desnitrificação são as do gênero *Pseudomonas*, e as espécies mais usualmente encontradas são: *Pseudomonas denitrificans*, *Pseudomonas stutzeri* e *Pseudomonas chlororaphis* (Zumft, 1997). O N₂O também pode ser formado pelo processo de oxidação da amônia por outras bactérias, a maior parte do gênero *Nitrosomonas* (Shrestha *et al.*, 2001), bem como por microrganismos do domínio *Archaea* (Ettwing *et al.*, 2016). A oxidação de amônia é um processo aeróbico de produção de energia, no qual o NH₃ é oxidado a NO₂, e pode ocorrer durante o processo de nitrificação (Daims *et al.*, 2015). Durante a oxidação da amônia, a principal via para produção do N₂O é a redução enzimática a partir do NO₂ e do NO (“desnitrificação-nitrificador”) (Kool *et al.*, 2011; Prosser *et al.*, 2020).

As elevadas disponibilidades de N e C lábil geralmente aumentam a taxa de desnitrificação da matéria orgânica nos solos, conforme a reação demonstrada. Portanto, a fertilidade do solo, a aplicação de fertilizantes nitrogenados e a presença de resíduos vegetais correlacionam-se de maneira positiva com as emissões de N₂O (Soares *et al.*, 2015). Entretanto, a produção total de N₂O e N₂ e a razão entre N₂O:N₂ formados dependem de uma complexa interação entre as propriedades físico-químicas do solo, os microrganismos, os fatores climáticos e as práticas de manejo (Saggar *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2015). Cada um desses fatores é composto por diversas variáveis que podem sofrer influência direta pela presença dos animais nas pastagens (Tomazi *et al.*, 2015; Buller *et al.*, 2015).

Anualmente, cerca de 1,5 Tg do total de emissões antropogênicas globais de N₂O (6,7 Tg N₂O-N/ano) é emitida a partir de excrementos produzidos por animais em pastejo, por meio de emissões diretas e indiretas (de nitrogênio excretado lixiviado e volatilizado) (Taghizadeh-Toosi *et al.*, 2011). Estima-se que de 75 a 95% do N ingerido que não é aproveitado pelos bovinos é excretado na urina ou nas fezes, o que fornece um rico

substrato para as reações de nitrificação e desnitrificação no solo (Eckard *et al.*, 2010; Saggiar *et al.*, 2013).

O N urinário é, em sua maioria, constituído por ureia, formada no fígado pelo metabolismo de compostos nitrogenados originados pela absorção no sistema digestivo ou pela mobilização/renovação tecidual dos animais (Santos, 2006). Dessa forma, existe uma grande variação na concentração do N solúvel urinário, conforme estágio fisiológico, composição da dieta, presença/ausência de enfermidades e *status* metabólico dos animais. Além desses fatores, a taxa de lotação e as condições edafoclimáticas das pastagens também interferem nas quantidades de N excretadas por área. De modo geral, a produção anual de N gerado pela excreção dos bovinos em pastagens é equivalente a 500-1000 kg N/ha (Haynes *et al.*, 1993). Em alguns casos, tais valores podem chegar a mais de 1600 kg N ha⁻¹ (Chirinda *et al.*, 2019). Esses valores podem ser mais de três vezes superiores à capacidade de capturação de N pelas pastagens (Haynes *et al.*, 1993), e até 6% desse N urinário depositado pode ser perdido como N₂O (IPCC, 2006).

Estudos recentes mostraram, no entanto, que as emissões de N₂O pela transformação dos excrementos bovinos são inferiores ao fator de emissão (EF) estabelecido pelo IPCC. Em uma revisão com 418 estudos, Cai e Akiyama (2017) encontraram uma EF do N₂O de 0,76% para urina e de 0,27% para esterco. Cardoso *et al.* (2019) corroboram esses resultados e encontraram EF de 0,84% para urina e de 0,28% para esterco.

As características físico-químicas do solo são determinantes no processo de emissão do N₂O pelas fezes e pela urina dos animais. Essas características podem ser intrínsecas ou causadas/agravadas pelas práticas agropecuárias. Aspectos como a textura, a drenagem (Krol, 2016) e os níveis de umidade (Cai *et al.*, 2017) possuem correlação com a formação do N₂O, em que quanto maior o teor de argila e umidade, maior a formação desse gás. Nota-se ainda que ocorre um aumento das emissões de N₂O após os eventos de chuva, especialmente em regiões de clima tropical (Bretas *et al.*, 2020). O mecanismo relacionado a esse aumento diz respeito ao preenchimento dos espaços porosos do solo com água, o que aumenta a anaerobiose e favorece as reações de desnitrificação e formação do N₂O (Smith, 2017).

Os níveis de compactação e os valores de pH dos solos são importantes fatores que interferem diretamente no metabolismo microbiano do nitrogênio, por diferentes vias. A compactação dos solos reduz a aeração e a concentração de oxigênio dissolvido com uma maior proporção de microambientes anaeróbicos ao longo do perfil do solo

(Butterbach-Bahl *et al.*, 2013). Essa condição favorece as reações de desnitrificação com maior proporção de N₂O formado (Kuypers *et al.*, 2018). Em relação ao pH, as reações de produção de N₂O são favorecidas quando os valores encontram-se abaixo de 6 (Firestone *et al.*, 1980). O mecanismo de elevação das emissões de N₂O em solos ácidos refere-se à inibição das enzimas NOR, responsáveis pela transformação do N₂O em N₂, (Robinson *et al.*, 2014). Tanto os baixos valores de pH quanto a compactação do solo reduzem as taxas de crescimento vegetal, o que restringe o processo de assimilação e deposição do N nos tecidos vegetais. Dessa forma, em solos ácidos e compactados, a capacidade de utilização do N no sistema é reduzida, com elevação das taxas de emissão do N₂O.

Solos ácidos e compactados são frequentes em pastagens degradadas e em lavouras implementadas e conduzidas com o uso de práticas agrícolas inadequadas. A degradação das pastagens interfere nas emissões de N₂O pela deposição de urina e por múltiplos mecanismos, que muitas vezes interagem, e, portanto, observam-se resultados contraditórios na literatura (Chirinda *et al.*, 2019)

Por fim, variáveis ambientais, como temperatura do ar e do solo, bioma (Tully *et al.*, 2017) e estação do ano (Chirinda *et al.*, 2019), também interferem na produção de N₂O. Sabe-se que baixas temperaturas reduzem a atividade microbiana, o que determina uma menor taxa de transformação do N pelos processos de nitrificação e desnitrificação no solo (Bell *et al.*, 2015). Esses processos podem ocorrer na faixa entre 0 °C e 32 °C, porém a faixa ótima é de 32 °C a 40 °C para a desnitrificação (Henze, 1995) e superior a 25 °C para a oxidação aeróbia da amônia (Pambrun *et al.*, 2006).

Ressalta-se que diversos estudos demonstraram que é possível reduzir as emissões de N₂O nos sistemas produtivos, com o uso de práticas que aumentam a eficiência do uso das pastagens e do desempenho animal (Sato *et al.*, 2017; Congio, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proporção de gases do efeito estufa emitidos no país evidencia a participação do setor pecuário – especialmente dos bovinos – no processo de intensificação do efeito estufa. Contudo, deve-se considerar o potencial de redução dos impactos provocados e a relevância desse setor na economia nacional e na produção de alimentos essenciais para a humanidade.

A formação do metano entérico e do óxido nitroso nos sistemas de produção ocorre por processos complexos e pela interação entre microrganismos, animais e

ambiente. A compreensão desses processos é fundamental para a aplicação de estratégias consistentes de redução dos impactos climáticos causados pela pecuária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. M. T. B.; Lixa, A. T.; De Oliveira, O. C. et al. Para Onde Vai a Pecuária Bovina Brasileira? In Anais do 56 Congresso SOBER - Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Campinas – SP, 2018

Asanuma, N.; Iwamoto, M.; Hino, T. Effect of the addition of fumarate on methane production by ruminal microorganisms in vitro. *Journal of Dairy Science*, v. 82, n.4, p. 780–787, 1999.

Associação Brasileira Das Indústrias Exportadoras De Carne (Abiec). Perfil da Pecuária no Brasil: Relatório anual 2020. São Paulo, 2020. 49p.

Bayer, C.; Gomes, J.; Zanatta, J. A.; et al. Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 146, p. 213-222, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.011>

Bell, M. J. et al. Nitrous oxide emissions from cattle excreta applied to a Scottish grassland: effects of soil and climate conditions and a nitrification inhibitor. *Science of the Total Environment*, v. 508, p. 343–353, 2015.

Benaouda, M. et al. Evaluation of the performance of existing mathematical models predicting enteric methane emissions from ruminants: Animal categories and dietary mitigation strategies. *Animal Feed Science and Technology*, v. 255, n. 114207, 2019.

Brasil. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa*. 4. ed. Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://sirene.MCTIC.gov.br/documents/1686653/1706227/4ed_ESTIMATIVAS_ANUAIS_WEB.pdf/a4376a93-c80e-4d9f-9ad2-1033649f9f93>. Acesso em: 04 ABR. 2020.

Bretas, I. L. et al. Nitrous oxide, methane, and ammonia emissions from cattle excreta on *Brachiaria decumbens* growing in monoculture or silvopasture with *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis*. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 295, n. 106896, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106896>

Buddle, B. M. et al. Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pasture. *Veterinary Journal*, v. 188, p. 11-17, 2011.

Buller, L. S.; Bergier, I.; Ortega, E. et al. Soil improvement and mitigation of greenhouse gas emissions for integrated crop–livestock systems: Case study assessment in the Pantanal savanna highland, Brazil. *Agricultural Systems*, v. 137, p. 206-219, 2015.

Butterbach-Bahl, K.; Baggs, E. M.; Dannenmann, M. et al. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 368 n. 20130122, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>

Cai, Y. E Akiyama, H. Effects of inhibitors and biochar on nitrous oxide emissions nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from urine patches of grazing animals on grasslands: a meta-analysis. *Soil Science and Plant Nutrition*, v. 63, n. 4, p. 405-414, 2017. DOI:10.1080/00380768.2017.1367627

Cai, Y., Chang, S. X. E Cheng, Y. Greenhouse gas emissions from excreta patches of grazing animals and their mitigation strategies. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 44–57, 2017.

Cardoso, A. S. et al. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems*, v. 143, p. 86–96, 2016.

Cardoso, A. S.; Oliveira, S. C. E Januskiewicz, E. R. Seasonal effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions for beef cattle excreta and urea fertilizer applied to a tropical pasture. *Soil and Tillage Research*, v. 194, n. 104341, 2019

Centro De Estudos Avançados Em Economia Aplicada (Cepea). *PIB Do Agronegócio Cresce 3,81% Em 2019*. Piracicaba, SP: [s. n.], 2020. 18p.

Chirinda, N. *et al.* Adequate vegetative cover decreases nitrous oxide emissions from cattle urine deposited in grazed pastures under rainy season conditions. *Scientific Reports*, v. 9, n 908, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37453-2>

Congio, G. F. S.; Chiavegato, M. B.; Batalha, C. D. A. Strategic grazing management and nitrous oxide fluxes from pasture soils in tropical dairy systems. *Science of The Total Environment*, v. 676 p. 493-500, 2019

Daims, H.; Lebedeva, E.; Pjevac, P. *et al.* Complete nitrification by *Nitrospira* bacteria. *Nature*, v. 528, p. 504–509, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16461>

Davidson, E. A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860. *Nature Geoscience*, v. 2, p. 659–662, 2009.

Eckard, R. J.; Grainger, C.; De 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.

Egan, P. J.; Mullin, M. Recent improvement and projected worsening of weather in the United States. *Nature*, v. 532, p. 357–360, 2016.

Ettwig, K. F. *et al.* Archaea catalyze iron-dependent anaerobic oxidation of methane. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, p. 12792–12796, 2016.

FAO. Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM). Rome, 2017. Disponível em: www.fao.org/gleam/en/. Acesso em: 23 mar. 2020.

Food And Agriculture Organization Of The United Nations (FAO). *Dairy Market Review*, Roma: [s. n.], 2019. 11p.

Gerber, *et al.* *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2013.

Graf, D. R. H. *et al.* Intergenomic comparisons high light modularity of the denitrification pathway and under pin the importance of community structure for N₂O emissions. *PLoS One*, v. 9, n. 114118, 2014.

Green, R., Allen, L., Bjørke-Monsen, A. *et al.* Vitamin B₁₂ deficiency. *Nature Reviews Disease Primers*, v. 3, n. 17040, 2017. <https://doi.org/10.1038/nrdp.2017.40>

Greening, C.; Geier, R.; Wang, C. *et al.* Diverse hydrogen production and consumption pathways influence methane production in ruminants. *ISME J.* v. 13, p. 2617–2632, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0464-2>

Johannes, G. *et al.* The primap-hist national historical emissions time series (1850-2014). *GFZ Data Services*, v. 1, n. 1, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5880/PIK.2017.001>.

Hartmann D. L.; Klein Tank, A. M. G.; Rusticucci, M. *et al.* Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, v. 9781107057999, p. 159-254. 2013.

- Hayatsu, M.; Tago, K.; Saito, M. Various players in the nitrogen cycle: Diversity and functions of the microorganisms involved in nitrification and denitrification. *Soil science and Plant Nutrition*, v. 54, p. 33-45, 2008.
- Haynes, R. J.; Williams, P. H. Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*, v. 49, p. 119–199, 1993.
- Henderson, G.; Cook, G. M.; Ronimus, R. S. Enzyme and gene based approaches for developing methanogen specific compounds to control ruminant methane emissions: a review. *Animal Production Science*, v. 58, n. 6, p. 1017-1026, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN15757>
- Henderson, G.; Cox, F.; Ganesh, S. *et al.* Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range. *Scientific Reports*, v. 5, n. 14567, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep14567>
- Henze, M.; Gujer, W.; Mino, T. *et al.* Activated sludgemodel. *IAWQ Scientific and Technical Report*, n. 3, Londres, 1995.
- Hook, S.E.; Wright, A. D. G.; McBride, B. W. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea*, v. 2010, p.1-11, 2010.
- Huang, Y.; Gerber, S. Global soil nitrous oxide emissions in a dynamic carbon-nitrogen model. *Biogeosciences*, v. 12, p. 6405–6427, 2015.
- Hulshof, R. B. A; Berndt, A.; Gerrits, W. J. J. *et al.* Dietary nitrate supplementation reduces methane emission in beef cattle fed sugarcane-based diets. *Journal of Animal Science*, v. 90, p. 2317–2323, 2012.
- Hungate, R. E. The Rumen and its Microbes. *Academic Press*, New York, NY. 1966.
- IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Pesquisa Da Pecuária Municipal. *Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação*. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/3939> Acesso em: 05 mar. 2020.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Aquecimento Global de 1,5°C*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2018.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Fourth Assessment Report (AR4): Mitigation of Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/contents.html. Acesso em: 30 abril. 2020.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, 4. Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories, 2006 Disponível em: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Change. *Refinement to the 2006 IPCC*. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019. Disponível em <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 25 de mar de 2020.
- Janseem, P. H. Influence of hydrogen on rumen methane formation and fermentation balances through microbial growth kinetics and fermentation thermodynamics. *Animal Feed Science and Technology*, v. 160, p. 1-22, 2010.
- Joblin, K. N. Ruminant acetogens and their potential to lower ruminant methane emissions. *Australian Journal Agricultural Research*, v. 50, n. 8, p. 1321-1327, 1999.

- Johnson, K. A.; Johnson, D. E. Methane Emissions from Cattle. *Journal of Animal Science*, v. 73, p. 2483-2492, 1995.
- Kool, D. M. *et al.* Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 43, p. 174–178, 2011
- Krol, D. J. Improving and disaggregating N₂O emission factors for ruminant excreta on temperate pasture soils. *Science of the Total Environment*, v. 568, p. 327–338, 2016.
- Kuypers, M.; Marchant, H. E.; Kartal, B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews Microbiology*, v. 16, p. 263–276, 2018. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2018.9>
- Lambie S. C. *et al.* The complete genome sequence of the rumen methanogen *Methanosarcina barkeri* CM1. *Standards in Genomic Sciences*, v. 10, n. 57, 2015.
- Lemoine, A. *et al.* Case report of nutritional rickets in an infant following a vegan diet. *Archives de Pédiatrie*, v. 27, n. 4, p. 219-222, 2020.
- Li, Y. *et al.* The complete genome sequence of the methanogenic archaeon ISO4-H5 provides insights into the methylophilic lifestyle of a ruminal representative of the Methanomassiliicoccales. *Standards in Genomic Sciences*, v. 11, n. 59, 2016.
- Liu, X. J.; Mosier, A. R.; Halvorson, A. D. *et al.* Dinitrogen and N₂O emissions in arable soil: Effect of tillage, N source and soil moisture. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 39, p. 2362-2370, 2007.
- Liu, Z.; Liu, Y.; Shi, X.; Wang, J. *et al.* Enteric methane conversion factor for dairy and beef cattle: effects of feed digestibility and intake level. *Transactions of ASABE*, v.60, p.459-464, 2017. DOI: 10.13031/trans.11744.
- Machado, F. S.; Pereira, L. G. R.; Guimarães Jr. R. *et al.* Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação. *Embrapa Gado de Leite*. Juiz de Fora - MG, 2011.
- Milagres, J. J. M. 2014. Emissões de N₂ e N₂O provenientes do fertilizante aplicado a solos cultivados com cana de açúcar pelo método do traçador 15N. Piracicaba, SP. Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Doutor em Ciências, Universidade de São Paulo.
- Moorby, J.; Fleming, H.; Theobald, V. *et al.* Can live weight be used as a proxy for enteric methane emissions from pasture-fed sheep? *Scientific Reports*, v. 5, n. 17915, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep17915>
- Morgavi, D. P.; Forano, E.; Martin, C.; Newbold, J. Microbial ecosystem and methanogenesis in ruminants. *Animal*, v. 4, n. 7, p. 1024-1036, 2010.
- Naik, S. *et al.* Daily milk intake improves vitamin B-12 status in young vegetarian Indians: an intervention trial. *Nutrition Journal*, v. 12, n. 136, 2013.
- National Aeronautics And Space Administration (NASA) National Oceanic And Atmospheric Administration (NOAA). *Analyses Reveal 2019 Second Warmest Year on Record*. 2020. Disponível em <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-analyses-reveal-2019-second-warmest-year-on-record>. Acesso em 5 de maio de 2020.
- Nguyen, S. H.; Li, L.; Hegarty R. S. Effects of rumen protozoa of Brahman heifers and nitrate on fermentation and in vitro methane production. *Asian Australasian Journal of Animal Science*, v. 29, n. 6, p. 807-813, 2016.

OECD-FAO *Agricultural Outlook 2018-2027*. Roma: [s. n.], 2018. 112p.
https://doi.org/10.1787/agr_outlook-2018-en

Oswald, E. M.; Rood, R. B. A trend analysis of the 1930–2010 extreme heat events in the continental United States. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 53, p. 565–582, 2014.

Owens, F. N.; Goetsch, A. L. Ruminant fermentation. In: Church, D. C. (Ed). *The ruminant animal: digestive physiology and nutrition*. Waveland Press, p.145-171, 1988.

Pambrun, V.; Paul, E.; Sperandio, M. Modelling the partial nitrification in sequencing batch reactor for biomass adapted to high ammonia concentrations *Biotechnology & Bioengineering*, v. 95, n. 1, p. 120-131, 2006.

Patra, A. K.; Yu Z. Combinations of nitrate, saponin, and sulfate additively reduce methane production by rumen cultures in vitro while not adversely affecting feed digestion, fermentation or microbial communities. *Bioresource Technology*, v. 155 p. 129–135, 2014.

Patz, J. A.; Campbell-Lendrum, D.; Holloway, T.; Foley, J. A. Impact of regional climate change on human health. *Nature*, v. 438, p. 310–317. 2005.

Pedreira, M. S. et al. Ruminant methane emission by dairy cattle in southeast Brazil. *Scientia Agricola*, v.66, p.742-750, 2009.

Pereira, L. G. R. et al. Enteric methane mitigation strategies in ruminants: a review. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, v. 28 p. 124-143, 2015.

Peterson, T. C. et al. Monitoring and understanding changes in heat waves, cold waves, floods, and droughts in the United States: state of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 94, p. 821–834, 2013.

Pezzopane, J. R. M. et al. Cenários Futuros Das Pastagens No Brasil IN Anais Do Ix Simpósio Sobre Manejo Estratégico Da Pastagem. *IX Simpósio sobre Manejo Estratégico da Pastagem e VI Simpósio Internacional Sobre Produção Animal em Pestejo*. Viçosa - MG, 2019.

Potdar, R. D. et al. Improving women's diet quality preconceptionally and during gestation: effects on birth weight and prevalence of low birth weight — a randomized controlled efficacy trial in India (Mumbai Maternal Nutrition Project). *American Journal of Clinical Nutrition*, v. 100, p. 1257–1268, 2014.

Poulsen, M.; Schwab, C.; Borg Jensen, B. et al. Methylophilic methanogenic Thermoplasmata implicated in reduced methane emissions from bovine rumen. *Nature Communications*, v. 4, n. 1428 (013), 2013. DOI <https://doi.org/10.1038/ncomms2432>

Prosser, J. I. et al. Nitrous oxide production by ammonia oxidizers: Physiological diversity, niche differentiation and potential mitigation strategies. *Global Change Biology*, v. 26: p. 103– 118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.14877>

Robinson, A. et al. The effect of soil pH and dicyandiamide (DCD) on N₂O emissions and ammonia oxidizer abundance in a stimulated grazed pasture soil. *Journal of Soils and Sediments*, v. 14, p. 1434–1444, 2014.

Saggar, S. et al. Denitrification and N₂O:N₂ production in temperate grasslands: Processes, measurements, modelling and mitigating negative impacts. *Science of the Total Environment*, v. 465, p. 173–95, 2013.

Santos, F. A. P. Metabolismo de proteína. In: Berchieli, T. T.; Pires, A. V.; Oliveira, S. G. *Nutrição de ruminantes*, Jaboticabal: Funep, 2006. Cap. 9, p. 255-285.

Sato, J. H.; De Carvalho, A. M.; De Figueiredo, C. C. *et al.* Nitrous oxide fluxes in a Brazilian clayey oxisol after 24 years of integrated crop-livestock management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, v. 108, p. 55–68, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9822-5>

Schneider S. H. The Greenhouse Effect: Science and Policy. *American Association for the Advancement of Science*, v. 243, n. 4892 p. 771-781, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.243.4892.771>

Schuchmann, K.; Müller, V. Autotrophy at the thermodynamic limit of life: a model for energy conservation in acetogenic bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, v. 12, p. 809–821, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/nrmicro3365>

Selten, F. M.; Bintanja, R.; Vautard R. *et al.* Future continental summer warming constrained by the present-day seasonal cycle of surface hydrology. *Scientific Reports*, v. 10, n. 4721, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61721-9>

Shrestha, N. K.; Hadano, S.; Kamachi, T. *et al.* Conversion of ammonia to dinitrogen in wastewater by *Nitrosomonas europaea*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 90, p. 221–232, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1385/ABAB:90:3:221>

Sistema De Estimativas De Emissões e Remoções De Gases De Efeito Estufa (SEEG). *Análises Das Emissões Brasileiras De Gases Do Efeito Estufa E Suas Implicações Para As Metas Do Brasil*. 2019. Disponível em: <http://seeg.eco.br/o-que-e-o-seeg>

Smedman, A.; Månsson-Lindmark, H.; Drewnowski, A.; Edman, A. M. Nutrient density of beverages in relation to climate impact. *Food & Nutrition Research*, v. 54, p. 5170-577, 2010.

Smith, K.A., 2017. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales. *European Journal of Soil Science*, 68, 137-155. <https://doi.org/10.1111/ejss.12409>.

Soares, J.; Cassman, N.; Kielak, A. *et al.* Nitrous oxide emission related to ammonia-oxidizing bacteria and mitigation options from N fertilization in a tropical soil. *Scientific Reports*, v. 6, n. 30349, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep30349>

Taghizadeh-Toosi, A. *et al.* Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. *Journal of Environmental Quality*, v. 40, p. 468–476, 2011.

Thauer, R. K. The Wolfe cycle comes full circle. *PNAS*. v. 109, n. 38 p. 15084–15085, 2012.

Tomazi, M.; Magiero, E. C.; Assmann, J. M. *et al.* Sheep Excreta as Source of Nitrous Oxide in Ryegrass Pasture in Southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 5, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbcs20140497>

Tully, K. L. *et al.* Nitrous oxide and methane fluxes from urine and dung deposited on Kenyan pastures. *Journal of Environmental Quality*, v. 46, p. 921–929, 2017.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). Inventory of U. S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015. U. S. Environmental Protection Agency, Washington DC, 2017. Disponível em: <http://www3.epa.gov/climatechange/emissions/usinventory.report.html>. Acessado em 20 de mar de 2020

United Nations 2019 (UN 2019). 2019 Revision of World Population Prospects. Department of Economic and Social Affairs Population Dynamics. Disponível em <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 25 de mar de 2020.

United Nations Framework Convention On Climate Change (UNFCCC). *Greenhouse Gas Inventory Data*, 2017. Disponível em: http://di.unfccc.int/detailed_data_by_party.

United Nations Framework Convention On Climate Change (*UNFCCC*). *Paris Agreement*, Paris, 2015. 27p.

Van Soest, P. J. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2. ed. Ithaca, New York: *Cornell University Press*, 1994. 476 p.

Van Zijderveld, S. M.; Gerrits, W. J. J.; Dijkstra, J. *et al.* Persistency of methane mitigation by dietary nitrate supplementation in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 94 p. 4028–4038, 2011.

Wolin, M. J. The rumen fermentation: a model for microbial interactions in anaerobic ecosystems. *Advance Microbiology Ecology*, v. 3, p. 49-77, 1979.

Zumft, W. G. Cell biology and molecular basis of denitrification. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v. 61, p. 533–616, 1997.