

EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS PRODUTIVOS NO NORDESTE BRASILEIRO¹

*Diana Signor
Salette Alves de Moraes*

Introdução

Apesar de o efeito estufa ser um fenômeno que ocorre naturalmente na atmosfera terrestre e que está associado à manutenção da temperatura média do planeta em uma faixa adequada às formas de vida que se conhece, o crescente aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera em função de atividades humanas, intensificado desde o início da Revolução Industrial, tem elevado a temperatura média no planeta e pode ter consequências econômicas e ambientais desastrosas.

As emissões brasileiras de GEEs em 2017 foram estimadas em 2.070 Mt de CO₂-eq (SEEG, 2018). Desse valor, 23,9% são oriundos da atividade agropecuária, principalmente em função da criação de animais em pastagens e do uso de fertilizantes sintéticos.

¹ Os autores agradecem ao professor Carlos Clemente Cerri (in memoriam) por toda sua dedicação à ciência e por seu grande esforço e pioneirismo no estudo de emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira. Ao professor Cerri, dedicam este capítulo.

As contribuições da agropecuária brasileira para as emissões de GEEs ainda não estão completamente elucidadas para todas as regiões do País. Na região Nordeste, por exemplo, os estudos ainda são incipientes e os dados sobre as emissões de GEEs são estimados e não medidos in situ. A determinação das emissões em diferentes regiões implica na contribuição de cada uma para a tomada de decisões no que tange à mudança no manejo do solo e a políticas públicas relacionadas às mudanças climáticas, a fim de maximizar o uso dos recursos naturais com menores impactos ambientais. Assim a geração de informações contribui para a mitigação das emissões de GEEs, além de trazer benefícios ao meio ambiente e proporcionar maior produtividade e rentabilidade para a agropecuária nacional.

Efeito estufa

Os principais gases que compõem a atmosfera do planeta Terra – nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) – praticamente não estão relacionados ao efeito estufa, que pode ser atribuído a moléculas mais complexas e menos abundantes, como vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), ozônio (O_3), halocarbonetos e aerossóis (Le Treut et al., 2007). Embora o vapor d'água seja o principal GEE, ele é pouco afetado por atividades humanas (FORSTER et al., 2007) e, por isso, CO_2 , CH_4 e N_2O são considerados os principais GEEs, que representam juntos mais de 80% da força radiativa promovida por todos os GEEs da atmosfera terrestre (Ciais et al., 2013).

A concentração atmosférica de CO_2 era de aproximadamente 280 partes por milhão (ppm) até o início da Revolução Industrial, enquanto os níveis de CH_4 na atmosfera variavam entre 400 partes por bilhão (ppb) e 700 ppb nos períodos glaciais e interglaciais, respectivamente (Forster et al., 2007). Atualmente, as concentrações atmosféricas de CO_2 , CH_4 e N_2O são da ordem de 390,5 ppm, 1.803 ppb e 324,2 ppb, respectivamente (Hartmann et al., 2013).

Em termos globais, o aumento das concentrações atmosféricas de CO_2 deve-se principalmente à queima de combustíveis fósseis e às mudanças de uso da terra, enquanto o aumento da concentração atmosférica de CH_4 tem origem nas áreas naturalmente alagadas, corpos d'água, áreas agrícolas e

aterros sanitários, na queima de combustíveis fósseis, de biocombustíveis e de biomassa e nos fluxos geológicos (Ciais et al., 2013). Já o aumento da concentração atmosférica de N_2O , que ocorreu a uma taxa de 0,73 ppb por ano ao longo dos últimos 30 anos, pode ser explicado por uso de fertilizantes nitrogenados em solos agrícolas, queima de combustíveis fósseis e atividades industriais, queima de biomassa e de biocombustíveis e deposição atmosférica de N (Ciais et al., 2013).

A fim de quantificar e comparar a capacidade de cada GEE de afetar a força radiativa e, portanto, o clima do planeta, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC) criou um índice chamado de potencial de aquecimento global (PAG ou GWP, sigla em inglês para *global warming potential*), que expressa informações sobre qualquer GEE em relação ao CO_2 ; levando em consideração as propriedades radiativas do GEE em questão e seu tempo de residência na atmosfera. O PAG de determinado gás consiste, portanto, na integração matemática da força radiativa de 1 kg desse gás, em um determinado horizonte de tempo, em comparação à força radiativa de 1 kg de CO_2 (Shine et al., 1990). O PAG é usado para padronizar os cálculos das emissões de todos os GEEs em uma mesma unidade: CO_2 -equivalente (CO_2 -eq), que representa a concentração de CO_2 que causaria a mesma força radiativa que esse determinado gás em um dado horizonte de tempo. Considerando um horizonte de tempo de 100 anos, o quinto relatório do IPCC mostra que o CH_4 tem um tempo de vida na atmosfera de 12,4 anos e um PAG de 28, enquanto o N_2O tem um tempo de vida de 121 anos e um PAG de 265 (Myhre et al., 2013), ou seja, mesmo em menores concentrações na atmosfera do que o CO_2 , o CH_4 e o N_2O têm potenciais de aquecimento global respectivamente de 28 e 265 vezes superiores ao do CO_2 .

Emissões de gases de efeito estufa pela agropecuária brasileira

O Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) do Brasil tem divulgado as informações sobre os inventários nacionais de emissões de GEEs, considerando as estimativas a partir do ano de 1970. Em 2017, os principais responsáveis pelas emissões brasileiras de GEEs foram os

setores de mudança de uso da terra e florestas (955.152,4Gg de CO₂-eq, 46,1% das emissões nacionais), energia (495.418,6 Gg de CO₂-eq, 20,8% das emissões nacionais) e agropecuária (446.154 Gg de CO₂-eq, 23,9% das emissões nacionais). Ainda em 2017, os tratamentos de resíduos e os processos industriais corresponderam a 4,4% e 4,8%, respectivamente, das emissões nacionais de GEEs (Seeg, 2018).

As principais origens das emissões de GEEs relacionadas à agropecuária brasileira são a fermentação entérica dos ruminantes (64,8%) e os solos agrícolas (27%) (Seeg, 2018).

O CH₄ é produzido no sistema digestório dos ruminantes e emitido para a atmosfera por meio da eructação desses animais. A produção de CH₄ por fermentação entérica é parte natural do processo de digestão dos herbívoros ruminantes e varia de acordo com a quantidade e a qualidade do alimento ingerido. Geralmente, quanto maior for o consumo de alimento, maior será a emissão de CH₄ e, quanto melhor for a qualidade da dieta, menor será a emissão por unidade de alimento ingerido (Segunda..., 2010).

As emissões pelos solos agrícolas, que são representadas principalmente por emissões de N₂O, estão relacionadas ao ciclo do N e aos processos de nitrificação e desnitrificação que esse elemento sofre no solo. A nitrificação é a oxidação aeróbica de NH₄⁺ a NO₃⁻ mediada por bactérias quimioautotróficas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Já o processo de desnitrificação consiste na redução do NO₃⁻ a N₂, reação que é mediada por bactérias anaeróbias facultativas (Moreira; Siqueira, 2006). A desnitrificação pode ser completa, resultando em N₂, ou incompleta, quando uma porção variável de N pode ser emitida para a atmosfera na forma de NO ou N₂O (Figura 1). Apesar de a desnitrificação ser o principal processo de formação de N₂O em solos, em condições de anaerobiose, a concentração de nitrito no solo aumenta e alguns microrganismos nitrificadores podem usar esse composto como aceptor de elétrons, produzindo NO ou N₂O por nitrificação (Snyder et al., 2009).

Assim o uso de fertilizantes nitrogenados (minerais ou orgânicos) e a deposição de resíduos sobre o solo, seja na forma de adubação orgânica, seja simplesmente pela deposição de resíduos excretados pelos animais nas pastagens, relacionam-se diretamente às emissões de N₂O pelos solos agrícolas, pois aumentam a disponibilidade de N no solo (nas formas de NH₄⁺ e NO₃⁻).

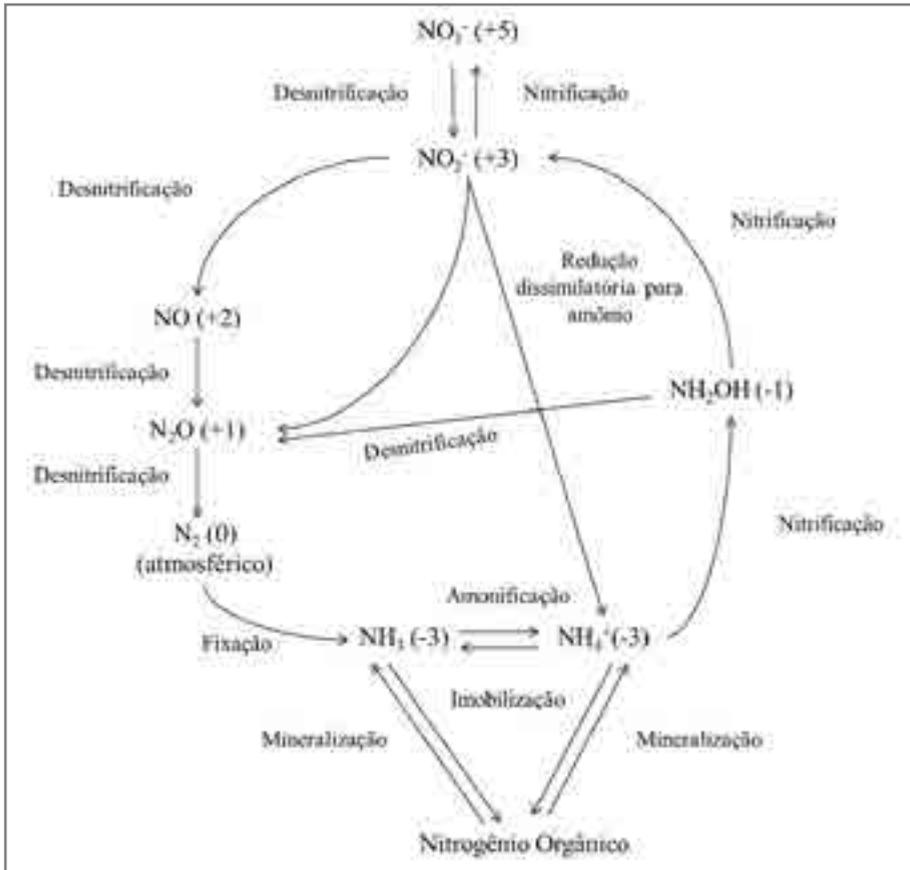


Figura 1. Ciclo do nitrogênio, cujos estados de oxidação são indicados entre parênteses e cujos processos estão identificados pelos nomes.

Fonte: Signor e Cerri (2013).

Estimativas das emissões para o Nordeste brasileiro

A região Nordeste é responsável por 2,7% das emissões brasileiras de CH₄ e 1,44% das emissões de N₂O (Tabela 1). Considerando apenas o setor agropecuário, a região Nordeste é responsável por 1,54% e 0,33% das emissões nacionais de CH₄ e N₂O, respectivamente (Tabela 2). Para esses dois GEEs, as maiores emissões ocorrem nos estados da Bahia, do Maranhão, do Ceará, de Pernambuco e do Piauí (Tabela 1), que são justamente os estados

da região Nordeste com os maiores rebanhos de bovinos, caprinos e ovinos (Tabela 2), ou seja, boa parte das emissões estimadas desses gases na região se deve a esses rebanhos, já que, nas condições de sequeiro (maior parte do Nordeste), a pecuária é a atividade agrícola predominante. No Maranhão, os rebanhos de caprinos e de ovinos correspondem a cerca de 8% do rebanho de bovinos e, na Bahia, os rebanhos de caprinos e ovinos somados correspondem a aproximadamente metade (64%) do rebanho bovino. Já nos estados do Piauí, de Pernambuco e do Ceará, em razão das condições climáticas, que dificultam a produção de pastagem, a situação se inverte: a quantidade de caprinos e ovinos é bem maior, superando em 145%, 98% e 42%, respectivamente, a quantidade de bovinos.

Apesar da relevância das estimativas das emissões de GEEs apresentadas nos inventários brasileiros de emissões de gases, os valores para os estados da região Nordeste foram calculados com base em valores tabelados e em fatores de emissão que não foram medidos nas condições específicas do Nordeste brasileiro. Isso se justifica pelo fato de os trabalhos de avaliação de emissão de GEEs na região ainda serem incipientes, embora a região englobe importantes áreas agrícolas [como os polos de produção de grãos entre Maranhão, Bahia e Piauí e entre Sergipe, Alagoas e Bahia; as áreas de fruticultura irrigada no Semiárido (polo Petrolina-Juazeiro); e as áreas de produção de cana-de-açúcar (*S. officinarum*) próximas ao litoral], além das áreas onde a pecuária é a principal atividade agrícola, como no Semiárido (criações de caprinos, ovinos e bovinos) e nas regiões mais úmidas no Maranhão (principalmente bovinocultura). Em razão dessa diversidade (atrelada ao fornecimento de alimentos tanto para o mercado interno quanto para exportação) e da importância da região no contexto das mudanças climáticas globais, há grande necessidade de expansão dos estudos relacionados à emissão de GEEs no Nordeste brasileiro. Com relação às mudanças climáticas, há que se ressaltar que os cenários de previsão indicam que os eventos de seca e a redução na precipitação serão cada vez mais intensos em vários pontos do Brasil, o que torna os conhecimentos gerados na região semiárida cada vez mais estratégicos para a adaptação de práticas de manejo para outras regiões do País. A seguir, serão comentados resultados de pesquisas já realizadas com a avaliação da emissão de GEEs no Nordeste brasileiro.

Tabela 1. Emissões de todos os setores e do setor agropecuário, de metano (CH₄) e de óxido nítrico (N₂O), pelos estados da região Nordeste do Brasil em 2017.

Estado	Emissões de todos os setores					
	Emissões de CH ₄ em 2017			Emissões de N ₂ O em 2017		
	(t)	% do Nordeste	% do Brasil	(t)	% do Nordeste	% do Brasil
Alagoas	21.447,8	4,4	0,1	328,4	3,6	0,1
Bahia	136.468,1	27,9	0,8	2.276,3	24,7	0,4
Ceará	75.756,3	15,5	0,4	1.742,1	18,9	0,3
Maranhão	94.966,4	19,4	0,5	1.718,5	18,7	0,3
Paraíba	24.940,6	5,1	0,1	478,6	5,2	0,1
Pernambuco	54.587,3	11,1	0,3	1.015,6	11,0	0,2
Piauí	39.689,5	8,1	0,2	980,6	10,7	0,2
Rio Grande do Norte	23.430,8	4,8	0,1	449,1	4,9	0,1
Sergipe	18.386,3	3,8	0,1	213,5	2,3	0,0
Nordeste	489.673,0	100,0	2,7	9.202,5	100,0	1,4
Brasil	18.165.281,2		100,0	640.801,6		100,0

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Estado	Emissões do setor agropecuário					
	Emissões de CH ₄ em 2017			Emissões de N ₂ O em 2017		
	(t)	% do Nordeste	% do Brasil	(t)	% do Nordeste	% do Brasil
Alagoas	12.014,6	6,2	0,10	152,2	8,5	0,03
Bahia	63.181,1	32,6	0,50	553,9	30,8	0,10
Ceará	16.592,5	8,5	0,13	171,7	9,6	0,03
Maranhão	47.416,7	24,4	0,38	295,3	16,4	0,06
Paraíba	9.003,8	4,6	0,07	94,9	5,3	0,02
Pernambuco	16.762,5	8,6	0,13	232,6	12,9	0,04
Piauí	12.952,1	6,7	0,10	149,7	8,3	0,03
Rio Grande do Norte	7.173,7	3,7	0,06	76,4	4,3	0,01
Sergipe	8.983,8	4,6	0,07	69,6	3,9	0,01
Nordeste	194.080,8	100,0	1,54	1.796,2	100,0	0,33
Brasil	12.614.110,2		100,00	536.692,6		100,00

Fonte: Seeg (2018).

Tabela 2. Efetivo dos rebanhos bovino, caprino e ovino no Brasil, em 2017.

Unidade territorial	Bovinos		Caprinos		Ovinos	
	Número de cabeças	%	Número de cabeças	%	Número de cabeças	%
Brasil	117.858168,00	100,0	8.254.561,00	100,0	13.770.906,00	100,0
Norte	35.563.948,00	20,7	188.900,00	2,3	408.462,00	3,0
Sudeste	31.449.257,00	18,3	143.502,00	1,7	429.749,00	3,1
Sul	23.564.736,00	13,7	152.550,00	1,8	3.304.397,00	24,0
Centro-Oeste	59.609.744,00	34,7	108.894,00	1,3	595.628,00	4,3
Nordeste	21.670.483,00	12,6	7.660.715,00	92,8	9.032.670,00	65,6
Maranhão	5.412.019,00	3,1	250.931,00	3,0	193.141,00	1,4
Piauí	1.428.093,00	0,8	1.847.919,00	22,4	1.665.125,00	12,1
Ceará	1.895.053,00	1,1	880.097,00	10,7	1.813.979,00	13,2
Rio Grande do Norte	757.945,00	0,4	281.795,00	3,4	532.179,00	3,9
Paraíba	1.050.021,00	0,6	545.994,00	6,6	506.190,00	3,7
Pernambuco	1.283.872,00	0,7	1.415.553,00	17,1	1.133.056,00	8,2
Alagoas	785.836,00	0,5	35.581,00	0,4	192.299,00	1,4
Sergipe	886.459,00	0,5	19.242,00	0,2	136.269,00	1,0
Bahia	8.171.185,00	4,8	2.383.603,00	28,9	2.860.432,00	20,8

Fonte: IBGE (2017).

Sistemas produtivos no Nordeste brasileiro

Sistemas de produção animal no Semiárido brasileiro

Em função das características climáticas, nas áreas dependentes de chuva, a criação animal é a grande vocação do Semiárido brasileiro. Apesar de a maior parte do efetivo da pecuária brasileira ser representada por bovinos, no Semiárido, uma parcela significativa é composta por pequenos ruminantes como ovinos e caprinos (Tabela 2), criados basicamente em sistemas de produção extensivos baseados em pastejo em áreas de Caatinga. Entretanto, nos locais onde a precipitação é um pouco maior, é possível também desenvolver a bovinocultura.

Os sistemas de produção animal desenvolvidos na região semiárida têm uma base fundamentada em ambientes silvipastoris, nos quais pastagens nativas da Caatinga são utilizadas como alimento para os animais. Durante o período das chuvas, a fitomassa ofertada pela Caatinga é diversificada em todos os estratos, mas normalmente diminui no período de estiagem. Dessa forma, os sistemas de produção animal no Semiárido associam o pastejo nas áreas nativas, na época chuvosa, ao uso de pastagens cultivadas adaptadas às condições climáticas da região, a exemplo do capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), na época seca (Voltolini et al., 2011).

Historicamente, os sistemas de produção animal no Brasil se desenvolveram por expansões de fronteiras agrícolas, com características extensivas de baixa infraestrutura, alta utilização dos recursos e esgotamento dos solos pelo superpastejo. Atualmente, vislumbra-se um processo de modernização das práticas de manejo, com adoção de tecnologias econômica e ambientalmente viáveis e que conferem maior sustentabilidade aos sistemas agrícolas, principalmente no que diz respeito ao maior acúmulo de carbono (C) e à menor emissão de GEEs.

Voltolini et al. (2011) indicaram que, no Semiárido brasileiro, o cultivo de leguminosas para a produção de fenos ou silagens, visando à alimentação dos animais na época seca do ano, também é uma importante estratégia de convivência desses sistemas de produção com a seca. Alternativas como essa podem traduzir-se em pecuária de baixa emissão de C, quando feitas as intervenções devidas com objetivos de diminuir emissões de GEEs, alinhando-se, portanto, ao processo de modernização das práticas de manejo que já se observam em outras regiões do Brasil.

Emissões de metano entérico

Fatores climáticos são preponderantes no aumento de emissões de GEEs. As mudanças climáticas, por exemplo, já têm afetado negativamente a disponibilidade de chuvas no Semiárido brasileiro e podem ocasionar falta de alimento, assim como queda na sua qualidade para os animais criados nessa região, o que pode causar aumento significativo das emissões de CH₄ entérico.

Em áreas de Caatinga pastejada por ovinos no Semiárido cearense, por exemplo, foram observadas variações no consumo e na produção de CH₄ em função da época do ano (períodos seco e chuvoso) e das áreas estudadas (Mota, 2013). No período chuvoso, foram observados maiores consumos de alimento em relação ao período seco. Entretanto as emissões de CH₄ entérico (grama por animal por dia) não foram maiores do que aquelas observadas no período seco do ano. Isso pode acontecer pelo fato de que a emissão de CH₄ diminui, quando o teor de fibra na dieta é mais baixo e os teores de energia digestível e proteína bruta são maiores, como ocorre com os alimentos fornecidos aos animais na época chuvosa.

Com base no estudo de Mota (2013), pode-se afirmar que a suplementação com alimentos de melhor qualidade na época de maior emissão (período seco), além do ajuste dos animais à oferta de forragem, é uma ferramenta estratégica para a mitigação das emissões de CH₄ entérico no Semiárido.

Gordiano (2015) conduziu um estudo com caprinos de corte no Sertão de Pernambuco. Os animais foram alimentados exclusivamente na Caatinga, na época chuvosa, e receberam suplementação concentrada na época seca [(ração concentrada contendo milho (*Zea mays* L.), soja (*Glycine max* L.) e feno triturado de gliricídia (*Gliricidia sepium* L.)]. Os resultados de Gordiano (2015) mostraram não haver diferença na emissão de CH₄ entérico pelos animais nas duas épocas estudadas. Isso confirma a necessidade da suplementação dos rebanhos com alimentos de melhor qualidade nutricional em períodos de baixa disponibilidade alimentar nas épocas, secas visando à mitigação das emissões de GEEs dos sistemas de produção animal no Semiárido.

Emissões de gases de efeito estufa do solo

Medeiros (2016) avaliou as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O em Caatinga nativa, Caatinga pastejada e em pastagem de capim-buffel em Petrolina, PE, entre fevereiro de 2015 e fevereiro de 2016, englobando as estações seca e chuvosa no período.

Os fluxos de N_2O de todas as áreas foram maiores no período chuvoso em relação ao período seco do ano. Entretanto, mesmo no período chuvoso, o maior fluxo de N_2O foi observado na Caatinga pastejada, enquanto as áreas de Caatinga nativa e de capim-buffel pastejado tiveram fluxos negativos (embora maiores que na época seca) e estatisticamente semelhantes entre si.

As emissões acumuladas de N_2O ao longo do ano foram de $-330,67 \text{ mg N m}^{-2}$ na pastagem de capim-buffel, $-187,47 \text{ mg N m}^{-2}$ na Caatinga nativa e $-1.140,89 \text{ mg N m}^{-2}$ na Caatinga pastejada (Tabela 3). As emissões acumuladas de CH_4 do solo foram maiores na área de Caatinga nativa, enquanto as emissões de CO_2 foram semelhantes entre as áreas durante o período de avaliação, o que sugere que o consumo da vegetação pelos animais afeta a ciclagem de C no solo (Tabela 3).

No estudo de Medeiros (2016), também foram apresentados os fatores de emissão de N_2O em função da deposição de dejetos de caprinos sobre o solo nas estações seca e chuvosa de 2015. Em nenhuma das épocas, houve efeitos das doses de dejetos sobre as emissões de N_2O do solo, mesmo com a ocorrência de chuvas durante o experimento conduzido na estação chuvosa. Esse comportamento muito provavelmente está relacionado à umidade do solo, que, nesse caso, seria o fator que limitaria mais as emissões de N_2O do que a disponibilidade de N no solo.

Ribeiro et al. (2016) avaliaram os fluxos de CO_2 , CH_4 e N_2O em áreas de Caatinga nativa e de pastagem cultivada (*Urochloa* ssp.) no Município de São João, PE, durante as estações seca e chuvosa dos anos de 2013 e 2014. Os fluxos de N_2O e de CO_2 em ambas as áreas foram semelhantes ao longo dos 2 anos de avaliação. As semelhanças nos fluxos de N_2O podem ser explicadas por semelhanças nos conteúdos de N no solo de Caatinga e no solo da pastagem cultivada.

Tabela 3. Emissões acumuladas de óxido nitroso (N_2O), metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) entre os meses de fevereiro de 2015 e fevereiro de 2016 em áreas de Caatinga nativa e pastejada e em área de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* L.).

Área	Emissão acumulada ⁽¹⁾		
	N_2O	CH_4	CO_2
	(mg N m ⁻²)	(mg C m ⁻²)	(g C m ⁻²)
Caatinga nativa	-187,47±229,49	224,83±63,60	271,87±59,11
Caatinga pastejada	-1.140,89±162,44	35,30±26,89	383,34±62,38
Capim-buffel	-330,67±97,59	38,69±14,85	278,90±36,16

⁽¹⁾Os valores representam a média e o erro-padrão da média (n=4).

Fonte: Adaptado de Medeiros (2016).

De forma geral, nesse estudo, os solos de Caatinga e de pastagem apresentaram consumo de CH_4 . Os fluxos de CH_4 foram maiores na área nativa apenas na estação chuvosa de 2014 e semelhantes entre Caatinga e pastagem em 2013 e na estação seca de 2014. As maiores emissões de CH_4 na estação chuvosa de 2014 estão associadas à umidade do solo e à menor disponibilidade de O_2 , condições em que microrganismos metanogênicos promovem a decomposição anaeróbica da matéria orgânica do solo e, assim, produzem CH_4 .

Os fluxos de N_2O não apresentaram correlação com a umidade do solo e, tanto em 2013 quanto em 2014, foram maiores na estação seca do que na estação chuvosa. Além disso, os fluxos de N_2O nesse estudo estiveram associados à temperatura do solo, o que mostra a influência da temperatura sobre a dinâmica do N no solo. Uma explicação para esse resultado seria que, com o aumento da temperatura, a atividade microbiana total do solo aumenta, o que faz aumentar a respiração do solo e gera alguns sítios de anaerobiose, onde o processo de desnitrificação é favorecido (Ribeiro et al., 2016).

Comparando os resultados de seu trabalho com os de outros trabalhos desenvolvidos no Brasil, Ribeiro et al. (2016) afirmaram que as emissões de GEEs na Caatinga são menores do que nos demais biomas brasileiros (Tabela 4). Contudo essa informação ainda precisa ser embasada em resultados de novas pesquisas desenvolvidas na região, já que os estudos sobre emissões de gases na Caatinga ainda são incipientes.

Tabela 4. Emissões de gases de efeito estufa [dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4)] em diferentes biomas brasileiros.

Bioma	Áreas nativas		
	CO_2	N_2O	CH_4
	($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)	($\text{mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)
Cerrado	35,04	1,2	-3,2
Floresta Amazônica	13,58	2,5	0,0
Mata Atlântica	35,04	4,4	-15,8
Caatinga	22,26	0,9	1,0
Usos antrópicos			
Cerrado	26,28	0,8	2,9
Floresta Amazônica	23,72	3,2	0,0
Mata Atlântica	60,44	2,6	-5,3
Caatinga	22,08	1,1	1,5

Fonte: Adaptado de Ribeiro et al. (2016).

Sistemas agrícolas no Nordeste brasileiro

Melão irrigado

Silva (2015) avaliou as emissões de N_2O no sistema de produção de melão (*Cucumis melo*) com uso de cobertura (*mulching* plástico) e fertirrigação no estado do Ceará, em um Argissolo Vermelho-Amarelo de textura arenosa. O autor constatou que a emissão total de N_2O no ciclo foi de aproximadamente $212 \text{ g NN}_2\text{O ha}^{-1}$ (Tabela 5).

As emissões de N_2O do solo variaram em função da distância do ponto de aplicação do fertilizante (na linha de plantio, na lateral e no centro da entrelinha) (Tabela 5). Portanto, para a quantificação adequada das emissões de GEEs em sistemas agrícolas, é necessário que sejam avaliadas as emissões na linha e na entrelinha da cultura.

Silva (2015) também observou que, na cultura do melão cultivado no Nordeste brasileiro, o fator de emissão de N_2O foi de 0,15%, ou seja, abaixo do fator de emissão proposto pelo IPCC (1%), o que possivelmente

se deve ao fato de a umidade do solo não ser tão elevada, apesar do uso de irrigação no sistema de produção avaliado, associado ao parcelamento da aplicação do nitrogênio via fertirrigação.

Em área de cultivo de meloeiro irrigado em Petrolina, PE, Souza et al. (2018) avaliaram o efeito do preparo do solo e de coberturas mortas sobre as emissões de CO₂ e observaram que os fluxos desse gás são menores, quando não há revolvimento do solo antes do plantio. Esse resultado demonstra o potencial do sistema de plantio direto para a região semiárida como ferramenta para mitigação das emissões de GEEs.

Cana-de-açúcar

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil é feito em duas regiões distintas: Centro-Sul (que inclui estados do Sul, do Sudeste e do Centro-Oeste) e Nordeste. Diversos trabalhos já foram realizados para avaliação das emissões de GEEs em vários sistemas produtivos na região Centro-Sul, mas pouco se conhece sobre as emissões na região Nordeste. Alguns trabalhos já realizados serão discutidos a seguir.

Tabela 5. Emissões de óxido nitroso (N₂O) nas linhas de plantio, na lateral e no centro das entrelinhas no cultivo de melão (C. melo) fertirrigado no estado do Ceará.

Fase fenológica	Duração (dias)		Linha			Centro			Lateral			Centro			Emissão total (g N-N ₂ O ha ⁻¹)
			Linha	Lateral	Centro	Linha	Lateral	Centro	Linha	Lateral	Centro	Linha	Lateral	Centro	
			(μg N-N ₂ O m ⁻² h ⁻¹)	(mg N-N ₂ O m ⁻²)	(g N-N ₂ O ha ⁻¹)										
Plântula	20	28,8	17,3	13,8	9,4	8,3	4,5	87,8							
Floração	20	28,7	8,5	13,8	6,0	4,1	2,9	68,3							
Frutificação	10	27,9	13,0	6,7	7,0	3,1	1,7	38,0							
Amadurecimento	7	12,8	9,5	2,1	9,4	1,6	1,6	17,6							
Total no ciclo								211,7							

Fonte: Adaptado de Silva (2015).

Portela et al. (2018) avaliaram as emissões de N_2O em área de cana-de-açúcar cultivada com diferentes quantidades de palhada sobre a superfície (0%, 50% e 100% da quantidade produzida pela cultura) em um Plintossolo Flúvico de textura arenosa (70% de areia), no Município de União, PI. Apesar de os fluxos de todos os tratamentos terem aumentado após a adubação nitrogenada, não houve variação das emissões totais de N_2O acumuladas ao longo do ciclo da cultura, em função das diferentes quantidades de palhada sobre a superfície, o que sugere que esse sistema de cultivo funciona de forma similar às áreas de plantio direto com longo período de implantação. Adicionalmente, Portela (2015) comparou as emissões desse mesmo estudo, medidas em campo, com as emissões simuladas utilizando o modelo matemático *DeNitrification-DeComposition Model* (DNDC) e observou concordância entre os valores, o que indica que o modelo pode ser usado para simulação das emissões de N_2O nas condições de cultivo de cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro.

Outras avaliações em áreas cultivadas com cana-de-açúcar foram realizadas por Lopes (2016) e Lopes et al. (2018) em trabalho que avaliou o efeito da fertirrigação por gotejamento subsuperficial sobre as emissões de GEEs do solo, em área cultivada com cana-de-açúcar em Teresina, PI, e que não só é um dos primeiros a avaliar as emissões de GEEs da cana-de-açúcar no Nordeste brasileiro, mas também é um dos poucos trabalhos a avaliar o sistema de fertirrigação.

Lopes et al. (2018) mostraram que o parcelamento da dose de N aplicada via fertirrigação é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de N_2O do solo, porém o aumento da dose de N de 60 para 120 kg ha^{-1} aplicado via fertirrigação não afetou as emissões de N_2O . Após a aplicação de N (na forma de ureia) via fertirrigação, os fluxos de N_2O aumentaram rapidamente. Entretanto, 1 semana após a aplicação, os fluxos nos tratamentos fertirrigados já retornaram a níveis semelhantes ao do tratamento-controle, explicando por que os fatores de emissão de N_2O são menores via fertirrigação.

Nas condições do estudo de Lopes (2016), o solo também funcionou como dreno de CH_4 e os maiores valores de oxidação desse gás ocorreram nos tratamentos que receberam a maior dose de N. Como no solo CH_4 e NH_4^+ podem competir pela mesma enzima, na presença de maior

quantidade de N no solo, há uma competição enzimática. Por isso deveria haver menor oxidação de CH_4 e, portanto, maior emissão desse gás. Ainda segundo esse mesmo autor, o parcelamento da adubação nitrogenada não promoveu a competição enzimática e permitiu que o solo funcionasse como dreno de CH_4 .

Manguezal sob pressão antrópica

Queiroz et al. (2019) avaliaram as emissões de GEEs do solo no manguezal do Rio Jaguaribe, em Aracati, CE. Nesse trabalho, foram comparadas as emissões em áreas com e sem presença de dejetos de carcinicultura. Os fluxos de CO_2 e de N_2O foram maiores na área que recebe adição de dejetos da carcinicultura em comparação às áreas sem influência dos dejetos (93% e 125%, respectivamente). Isso ocorre porque os dejetos são ricos em matéria orgânica e estimulam a decomposição microbiana e a liberação dos gases em questão. Os fluxos de CH_4 foram semelhantes nas duas condições. Portanto, a partir das observações, os autores demonstraram que a carcinicultura reduz o papel do mangue de mitigar emissões de GEEs.

Outro trabalho conduzido em áreas de mangue foi desenvolvido por Nóbrega et al. (2016), que avaliaram as emissões de CO_2 e CH_4 em três manguezais do Nordeste brasileiro. De forma geral, solos de mangues do Semiárido brasileiro não são importantes fontes de GEEs e os impactos antrópicos sobre essas áreas consistem em menor estoque de C e maior emissão de CO_2 . Apesar da existência desses resultados, como ressaltado por Nóbrega et al. (2016), ainda há necessidade de avaliação de fluxos sazonais de GEEs nas áreas de manguezais brasileiros.

Estudos em andamento e perspectivas

Apesar de ainda incipientes, os estudos sobre as emissões de GEEs no Nordeste brasileiro têm sido intensificados nos últimos anos. Parcerias entre diversas instituições de pesquisa e universidades têm resultado no avanço das informações em diversos sistemas de cultivo e em condições nativas.

Entre os estudos que estão em andamento na região, podem ser citados:

- Avaliação das emissões de GEEs nos cultivos de manga (*Mangifera indica*) e melão (*C. melo*) irrigados na região do Submédio São Francisco.
- Avaliações em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Sergipe, em Pernambuco, no Maranhão e no Piauí.
- Avaliações em áreas de Caatinga nativa e Caatinga sob pastejo no Sertão de Pernambuco.
- Emissões de GEEs e fatores de emissão para vinhaça, adubos verdes, fertilizantes minerais e palhada de cana-de-açúcar em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar em todo o Nordeste brasileiro.
- Considerando as variações edafoclimáticas dentro do ambiente semiárido, que condicionam a existência de sistemas de produção com características distintas, qualquer levantamento das emissões de GEEs e do balanço de C em sistemas de produção ou em condições naturais deve levar em conta as especificidades de cada ambiente. Assim alguns pontos importantes a serem abordados em estudos futuros na região são:
 - Variação das emissões de CH₄ e N₂O em função de tipo de solo, clima e vegetação dentro do Semiárido, na medida em que esses fatores interferem na disponibilidade de água e no aporte de resíduos vegetais, tanto nas áreas nativas quanto nas áreas cultivadas.
 - Variação intra e interanual das emissões de CH₄ e N₂O pelo solo, decorrentes da sucessão de estações seca e chuvosa, bem como da variação da quantidade de chuva ao longo dos anos.
 - Variação das emissões de CH₄ entérico em função da categoria e da espécie animal, bem como da variação da qualidade da alimentação fornecida aos animais.
- Emissões de diversos cultivos irrigados em função de fertirrigação e de uso de adubos verdes.
- Determinação de fatores de emissão de N₂O em sistemas agrícolas e pecuários no Semiárido.
- Relação das emissões de GEEs do solo com a diversidade microbiana.

Considerações finais

Os estudos de avaliação das emissões de GEEs na região Nordeste ainda são muito recentes e incipientes e, apesar das várias iniciativas em andamento, ainda não há informações conclusivas para os sistemas naturais e para os sistemas de produção da região. Entretanto, em um futuro próximo, a divulgação de novos resultados de pesquisa contribuirá para o avanço do conhecimento e para o desenvolvimento de ações de mitigação das emissões de GEEs na região. Em um contexto de mudanças climáticas e de aumento dos eventos extremos de seca em outras regiões do Brasil, essas informações torna-se-ão cada vez mais estratégicas para a sustentabilidade da agricultura não apenas no Nordeste, mas também em outras regiões do Brasil.

Referências

CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; LE QUÉRÉ, C.; MYNENI, R. B.; PIAO, S.; THORNTON, P. Carbon and other biogeochemical cycles. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MEDGLEY, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 465-570.

ESTIMATIVAS anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. 2. ed. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014. 161 p. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706227/Estimativas+2ed.pdf/0abe2683-e0a8-4563-b2cb-4c5cc536c336>>. Acesso em: 17 nov. 2014.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER, H.L. (ed.). **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 129-234.

GORDIANO, L. A. **Consumo e digestibilidade de nutrientes e emissão de metano por caprinos em pastejo na Caatinga**. 2015. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina.

HARTMANN, D. L.; KLEIN, A. M. G.; RUSTICUCCI, M.; ALEXANDER, L. V.; BRÖNNIMANN, S.; CHARABI, Y.; DENTENER, F. J.; DLUGOKENCKY, E. J.; EASTERLING, D. R.; KAPLAN, A.; SODEN, B. J.; THORNE, P. W.; WILD, M.; ZHAI, P. M. Observations: atmosphere and surface. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MEDGLEY, P. M. (ed.). **Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 159-254.

IBGE. **Censo Agropecuário, 2017.** Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017#pecuaria>>. Acesso em: 16 jul. 2019.

LE TREUT, H.; SOMERVILLE, R.; CUBASCH, U.; DING, Y.; MAURITZEN, C.; MOKSSIT, A.; PETERSON, T.; PRATHER, M. Historical overview of climate change. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILLER, H. L. (ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 93-127.

LOPES, A. da S.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; BASSOI, L. H.; SILVA, J. F.; BASTOS, E. A.; PAULO, V. de F. Nitrous oxide emission in response to N application in irrigated sugarcane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p.758-763, 2018.

LOPES, A. S. **Emissões de gases de efeito estufa em cana-de-açúcar fertirrigada por gotejamento subsuperficial.** 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro.

MEDEIROS, T. A. F. **Gases de efeito estufa do solo em um sistema silvipastoril de caprinos de corte no sertão Pernambucano.** 2016. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Ciências Agrárias, Petrolina.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo.** 2. ed. atual. ampl. Lavras: Ed. da Ufla, 2006. 729 p.

MOTA, C. M. **Emissão de metano entérico por ovinos em diferentes sistemas de produção no semiárido.** 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral.

MYHRE, G., D. SHINDELL, F.-M. BRÉON, W. COLLINS, J. FUGLESTVEDT, J. HUANG, D. KOCH, J.-F. LAMARQUE, D. LEE, B. MENDOZA, T. NAKAJIMA, A. ROBOCK, G. STEPHENS, T. TAKEMURA AND H. ZHANG. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX AND P.M. MIDGLEY (ed.). **Climate Change 2013: The Physical**

Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 659-740.

NÓBREGA, G. N.; FERREIRA, T. O.; SIQUEIRA NETO, M.; QUEIROZ, H. M.; ARTUR, A. G.; MENDONÇA, E. DE S.; SILVA, E. DE O.; OTERO, X. L. Edaphic factors controlling summer (rainy season) greenhouse gas emissions (CO₂ and CH₄) from semiarid mangrove soils (NE-Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 542, Part A, p. 685-693, Jan. 2016.

PORTELA, M. G. T. **Fluxo de óxido nitroso e atributos microbiológicos do solo cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes níveis de palhada**. 2015. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina.

PORTELA, M. G. T.; LEITE, L. F. C.; SIGNOR, D.; ALVES, B. J. R.; SILVA, A. L. Emissões de óxido nitroso em solo com cultivo de cana-de-açúcar sobre palhada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 3, e5564, 2018.

QUEIROZ, H. M. **Dinâmica do nitrogênio e emissão de gases de efeito estufa em solo de manguezal no semiárido**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

QUEIROZ, HERMANO MELO ; ARTUR, ADRIANA GUIRADO ; KENJI TANIGUCHI, CARLOS ALBERTO ; SOUZA DA SILVEIRA, MARCIA RÉGIA ; COSTA DO NASCIMENTO, JULIANA ; NÓBREGA, GABRIEL NUTO ; OTERO, XOSÉ LUIS ; FERREIRA, TIAGO OSÓRIO . Hidden contribution of shrimp farming effluents to greenhouse gas emissions from mangrove soils. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 221, p. 8-14, May 2019.

RIBEIRO, K.; SOUZA-NETO, E. R.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; LIMA, J. R. S.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, Nov. 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.095.

SEGUNDA comunicação nacional do Brasil à convenção-quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília, DF: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. v. 2, 280 p.

SHINE, K. R. G.; DERWENT, D. ; WUEBBLES, J.; MORCRETTE, J. J. Radiative forcing of climate. In: HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. C.; EPHRAUMS, J. J. (ed.). **Climate change: the IPCC scientific assessment**. Cambridge: Cambridge University, 1990. Chapter 7.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: a review. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 3, p. 322-338, jul./set. 2013. DOI: 10.1590/S1983-40632013000300014.

SILVA, L. T. **Produção de melão no semiárido brasileiro: fator de emissão de óxido nitroso N₂O e qualidade pós-colheita**. 2015. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia) –

Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró.

SNYDER, C. S.; BRUULSEMA, T. W.; JENSEN, T. L.; FIXEN, P. E. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 133, n. 3-4, p. 247-266, Oct. 2009. DOI: 10.1016/j.agee.2009.04.021.

SOUZA, T. L. de; MACEDO, A. de; BARRETO, B. M. C.; SILVA, V. C. da; BARRO, M. N. de; MARTINS, A. S. da S.; BRITO, M. I. C. de; GIONGO, V.; SIGNOR, D. Efeitos de práticas conservacionistas sobre as emissões de CO₂ no cultivo do meloeiro irrigado no Submédio do Vale do São Francisco. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA SEMIÁRIDO, 13., 2018, Petrolina. **Anais...** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2018. p. 127-133. (Embrapa Semiárido. Documentos, 283)..

VOLTOLINI, T. V.; MORAES, S. A. de; ARAUJO, G. G. L. de; SANTOS, R. M. Principais modelos produtivos na criação de caprinos e ovinos. In: VOLTOLINI, T. V. (ed.). **Produção de caprinos e ovinos no Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. p. 219-232.