

# QUÍMICA AMBIENTAL E O IMPACTO AMBIENTAL RELACIONADO AOS GASES DE EFEITO ESTUFA

*ENVIRONMENTAL CHEMISTRY AND THE ENVIRONMENTAL IMPACT RELATED TO GREENHOUSE GASES*

*QUÍMICA AMBIENTAL E IMPACTO AMBIENTAL RELACIONADO CON GASES DE EFECTO INVERNADERO*

Gerson Dalcin<sup>1</sup>  
Lígia Fernanda Kaefler Mangini<sup>2</sup>  
Luciane de Godoi<sup>3</sup>

## Resumo

Este artigo aborda a química ambiental e sua relação com os Gases de Efeito Estufa (GEE), cujo aumento de emissões resulta no aquecimento global, potencializado por ações antrópicas. Os GEE são identificados a partir do Protocolo de Kyoto, tratado internacional entre os países signatários para redução da dispersão desses gases na atmosfera, entre os quais estão o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), o metano (CH<sub>4</sub>), os clorofluorcarbonetos (CFC), os hidrofluorcarbonetos (HCFC), os perfluorcarbonetos (PFC) e o hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>). A partir de um levantamento bibliográfico qualitativo, discutem-se as características desses gases, bem como seus ciclos relacionados à química ambiental. Ademais, recorre-se ao conceito de Potencial de Aquecimento Global (GWP, da sigla em inglês *Global Warming Potential*), como métrica padronizada do impacto dos gases estudados sobre o aquecimento global, relativos a duas situações: a destruição da camada de ozônio e a formação de uma camada que impede a radiação refletida da terra de se dispersar. Por fim, apresentam-se ações para minimizar o lançamento desses gases na atmosfera.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas; química ambiental; gases de efeito estufa.

## Abstract

This article addresses environmental chemistry and its relationship with Greenhouse Gases (GHG), whose increased emissions result in global warming, potentiated by anthropic actions. The GHG are identified from the Kyoto Protocol, an international treaty between signatory countries to reduce the dispersion of these gases in the atmosphere, among which are carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), methane (CH<sub>4</sub>), chlorofluorocarbons (CFC), hydrofluorocarbons (HCFC), perfluorocarbons (PFC) and sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>). Based on a qualitative bibliographic survey, the characteristics of these gases are discussed, as well as their cycles related to environmental chemistry. Furthermore, the concept of Global Warming Potential (GWP) is used as a standardized metric of the impact of the gases studied on global warming, related to two situations: the destruction of the ozone layer and the formation of a layer that prevents the radiation reflected from the earth to disperse. Finally, actions to minimize the release of these gases into the atmosphere are presented.

**Keywords:** climate change; environmental chemistry; greenhouse gases.

## Resumen

Este artículo trata la química ambiental y su relación con los gases de efecto invernadero (GEI), cuyo aumento de emisiones provoca el calentamiento global, potencializado por acciones antrópicas. Los GEI se identifican a partir del Protocolo de Kyoto, tratado internacional entre los países signatarios para la reducción de la dispersión de esos gases en la atmósfera, entre los cuales están el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>), los clorofluorocarbonos (CFC), los hidrofluorocarbonos (HCFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). A partir de una revisión bibliográfica cualitativa, se estudian las características de esos gases, así

<sup>1</sup> Acadêmico no curso de Química do Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: gersondalcin@gmail.com.

<sup>2</sup> Professora no Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: ligiafernanda@gmail.com.

<sup>3</sup> Docente na área de Exatas no Centro Universitário Internacional UNINTER. E-mail: luciane.g@uninter.com.

como sus ciclos, relacionados con la química ambiental. Además, se remite al concepto de Potencial de Calentamiento Global (GWP, de la sigla en inglés de *Global Warming Potential*), como medida estandarizada del impacto de los gases estudiados sobre el calentamiento global, relativos a dos situaciones: la destrucción de la capa de ozono y la formación de una capa que impide la dispersión de la radiación reflejada desde la tierra. Para finalizar, se presentan acciones para minimizar las emisiones de esos gases a la atmósfera.

**Palabras-clave:** cambios climáticos; química ambiental; gases de efecto invernadero.

## 1 Introdução

Os efeitos do desbalanceamento climático se intensificam a cada dia, e muitos estão relacionados ao aumento da temperatura. Trata-se do aquecimento global, resultado de vários fatores, entre os quais se destaca a influência humana.

A ação do homem provoca alterações no planeta e existem evidências suficientes de que podem comprometer gerações futuras. A poluição nas grandes metrópoles do mundo, as desconformidades climáticas, a falta de água potável e as doenças decorrentes das alterações climáticas são alguns sinais (VIOLA, [s.d.]; MENDONÇA, 2006; MOLION, 2013).

As mudanças climáticas são prejudiciais à biodiversidade, obrigam espécies a se adaptarem, e assim alteram suas características. O aumento da temperatura dos oceanos e das camadas superiores da Terra provoca mudanças que comprometem os ecossistemas e as espécies que os habitam, que correm risco de extinção, considerando um aumento de 1,5 a 2,0 °C na temperatura global.

Grande parte do aquecimento global se deve aos Gases de Efeito Estufa (GEE) lançados na atmosfera em função das atividades antrópicas necessárias para sustentar os padrões de produção e de consumo, e ao significativo crescimento populacional.

O assunto é pauta de discussões entre líderes mundiais, principalmente nos últimos anos, gerando vários acordos e tratados, entre os quais estão o Protocolo de Montreal, em 1978, o Tratado de Kyoto, em 1997 e o Acordo de Paris, em 2015. O Tratado de Kyoto aprofunda as mudanças climáticas relacionadas aos GEE.

Entender como a Química Ambiental se apresenta nas questões dos gases de efeito estufa é de extrema importância, pois, a química pode ser grande aliado no combate ou na mitigação dos gases de efeito estufa.

## 2 Metodologia

Este artigo resulta de pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa sobre o tema química ambiental e sua relação com os GEE, na linha de pesquisa *Química e Sociedade*. Para

Godoy (1995), a abordagem qualitativa “[...] permite que a imaginação e a criatividade levem os investigadores a propor trabalhos que explorem novos enfoques.” (GODOY, 1995, p. 21).

Inicialmente, baseada no Protocolo de Kyoto, a pesquisa buscou informações a respeito dos principais gases de efeito estufa e sua inter-relação. Na sequência, analisou-se a relação de cada um dos gases com o processo de aquecimento global. Além de protocolos, recorreu-se a outras fontes bibliográficas, normativas técnicas e jurídicas, como as Normas ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), por meio da ISO 14064, que trata dos gases de efeito estufa, da qual se extraíram dados para produção deste artigo.

Estudaram-se cada um dos gases para entender sua composição química, formação e demais características, além de averiguar seu Potencial de Aquecimento Global (GWP). Analisaram-se tais informações a partir do entendimento a respeito da química ambiental relacionada ao GEE, apresentando algumas possíveis soluções para minimização de impactos ao meio ambiente.

Para aprofundamento das compreensões sobre química ambiental e sua relação com GEE, selecionaram-se, principalmente, os autores Martins *et al.* (2003), VIOLA, ([*s.d.*]), Mendonça (2006) e Mattos (2001), além de dados do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas, da Norma ABNT ISO 14064 – Gases de Efeito Estufa, Parte 1.

A seguir, identificam-se, no Protocolo de Kyoto, o grupo de gases classificados como Gases de Efeito Estufa, por seus impactos climáticos.

### **3 Protocolo de Kyoto**

O Protocolo de Kyoto é um tratado internacional em que os países signatários, através de seus representantes, comprometem-se a reduzir as emissões de GEE na atmosfera em seus países. Trata-se de acordo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC).

O tratado foi assinado em Kyoto, no Japão, em 11 de dezembro de 1997, e entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, quando atingiu a meta de 50% de ratificações entre os 84 signatários originais. O objetivo do protocolo é estabilizar as concentrações dos GEE na atmosfera a um nível de baixo risco para o sistema climático, e, conseqüentemente, para os demais fatores ambientais afetados.

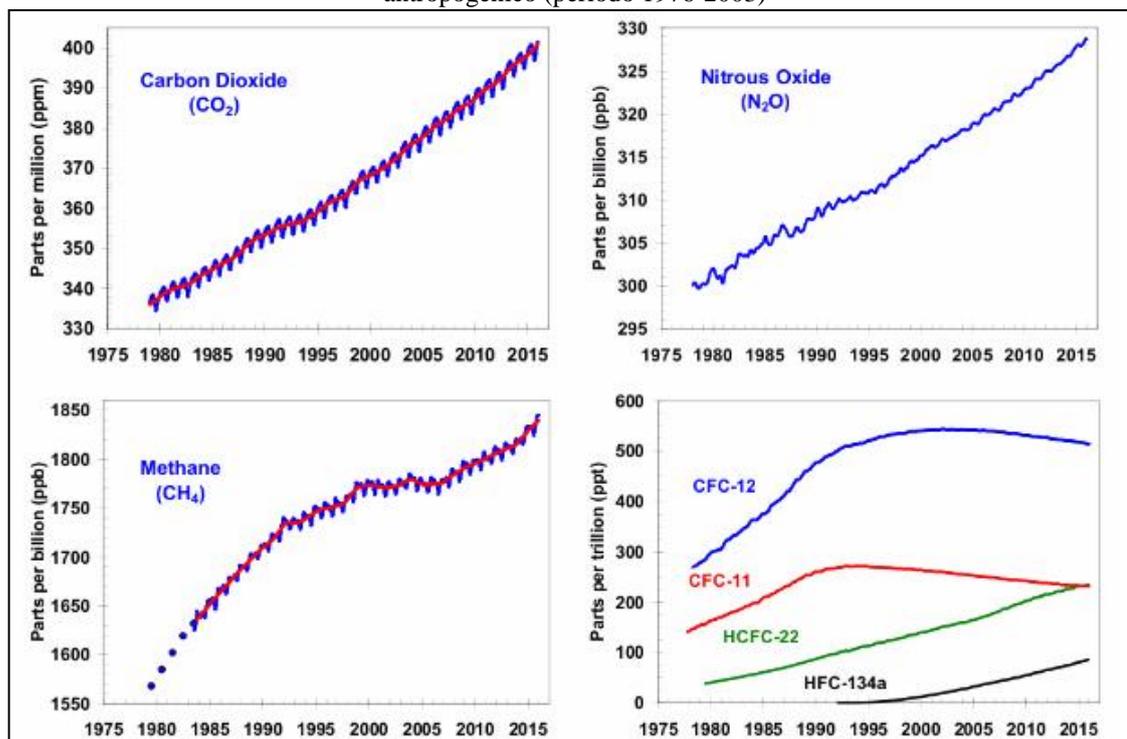
#### **3.1 Gases de efeito estufa (GEE)**

O Protocolo de Kyoto determina os gases cujas emissões devem ser reduzidas (IPCC, 1990):

- CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono;
- N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso;
- CH<sub>4</sub> – Metano;
- CFCs – Clorofluorcarbonetos;
- HFCs – Hidrofluorcarbonetos;
- PFCs – Perfluorcarbonetos;
- SF<sub>6</sub> – Hexafluoreto de enxofre.

Estudos demonstram que a proporção dos gases a que se refere o Protocolo de Kyoto se intensificaram desde a Revolução Industrial, como mostra a Figura 1, a respeito dos dados apresentados pelo site oficial do *Earth System Research Laboratory*.

**Figura 1:** Concentração na atmosfera (PPM) dos cinco gases responsáveis por 97% do efeito estufa antropogênico (período 1976-2003)



Fonte: Earth System Research Laboratory, 2017.

### 3.2 Perfil de emissões

Estabelecer o perfil de emissões de GEE é importante, por permitir uma visão de como as organizações se comportam em relação aos GEE, bem como possibilita o conhecimento dos processos para quantificar as emissões de determinada organização (ABNT, 2017).

A partir da identificação das fontes e sumidouros do GEE, e da abrangência dos processos de contabilização de suas respectivas emissões ou remoções, obtêm-se o perfil e a maneira como a organização se comporta em relação às emissões, além das características mais relevantes em relação aos GEE (ABNT, 2017).

Nesse sentido, o inventário é um instrumento para contribuir com a construção do perfil de emissões, possui papel central na identificação de ações efetivas e de gargalos potenciais para o alcance de uma economia de baixo carbono.

### 3.3 Brasil e GEE

De acordo com os dados apresentados durante a Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas (COP 17), em Durban, ZA, em 2011, o Brasil ficou em sexto lugar no ranking dos países emissores por liberar, entre 2009 e 2010, cerca de 1.144 megatoneladas de CO<sub>2</sub>eq.

A primeira posição da lista dos mais emissores do planeta ficou com a China, que liberou 9.441 megatoneladas de CO<sub>2</sub>eq na atmosfera, superando os EUA, que ocupam o segundo lugar do *ranking*, com 6.539 megatoneladas de CO<sub>2</sub>eq, país desenvolvido que mais polui no setor energético.

Para melhor compreender a participação brasileira nas negociações do regime de mudanças climáticas, Viola ([s.d.]) salienta que, em relação às emissões de carbono, o Brasil tem três grandes vantagens e uma grande desvantagem.

As três vantagens são: ser um país de renda média (estando fora dos compromissos obrigatórios de redução de emissões de carbono correspondentes aos países desenvolvidos), ter uma matriz energética com forte peso da hidroeletricidade (mais de 90% da eletricidade gerada a partir de fontes hídricas) e conseqüentemente muito limpa do ponto de vista das emissões estufa, e, possuir no seu território 16% das florestas mundiais (tendo grande importância no ciclo global do carbono). A grande desvantagem é ter uma grande emissão de carbono derivada do uso da queimada na agricultura tradicional e do desmatamento na Amazônia. (VIOLA, [s.d.], [n.p.]).

A seguir, apresenta-se o estudo de cada um dos gases do efeito estufa, suas características, sua composição e contribuição para o perfil de aquecimento e mudanças climáticas.

### 3.4 CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono (também conhecido como anidrido carbônico) ou gás carbônico é um composto químico constituído por dois átomos de oxigênio e um átomo de carbono. Sua representação química é CO<sub>2</sub>. O dióxido de carbono foi descoberto pelo escocês Joseph Black,

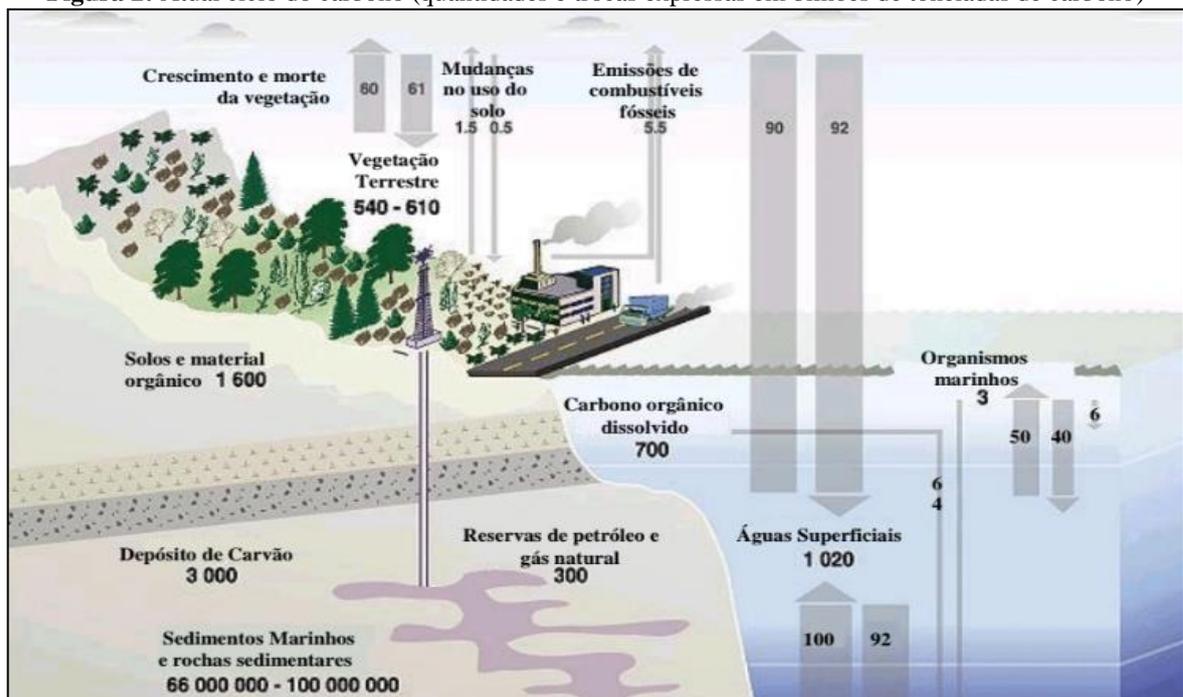
em 1754. Existem estimativas sobre a concentração de CO<sub>2</sub>, devido às emissões antropogênicas e a mecanismos de retroalimentação, de 1,5 ppmv (parte por milhão em volume) ao ano (IPCC, 1990). Este aumento da concentração do CO<sub>2</sub> na atmosfera resulta principalmente da queima de combustíveis fósseis e, secundariamente, do desflorestamento, da mudança no uso do solo e da fabricação de cimento (o processamento de cimento emite grande quantidade de CO<sub>2</sub>).

### 3.4.1 Ciclo do carbono

O ciclo do carbono é considerado de maior interesse para a mudança global (MATTOS, 2001), compõe-se de todas as reservas e trocas de carbono de uma reserva para outra por processos químicos, físicos, geológicos e biológicos. As quatro reservas mais importantes de carbono da Terra, onde acontecem as trocas, são a atmosfera, a biosfera terrestre (geralmente inclui os sistemas de água doce), os oceanos e os sedimentos (incluindo os combustíveis fósseis).

A Figura 2 apresenta o ciclo do carbono, em que o dióxido de carbono funciona como uma cortina de gás que vai da superfície da Terra em direção ao espaço, impedindo que a energia do sol, absorvida pela Terra durante o dia, seja emitida de volta ao espaço. Este aprisionamento é importante para manutenção da temperatura da Terra, porém, o excesso causa os aumentos de temperaturas na Terra.

**Figura 2:** Atual ciclo do carbono (quantidades e trocas expressas em bilhões de toneladas de carbono)

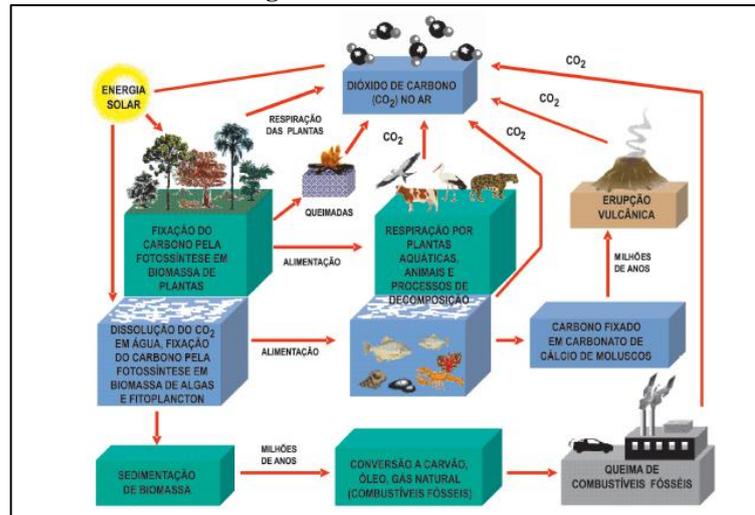


Fonte: Mattos, 2001, p. 58.

### 3.4.2 Química carbono

Em química ambiental, o carbono gera mais interesse em relação às queimas de combustíveis fósseis e de biomassa, à respiração de pessoas e de animais, bem como à movimentação de solo e às atividades naturais (Figura 3). Segundo Martins *et al.* (2003), o ciclo do carbono, entre seus caminhos de formação pelos processos biogeoquímicos, segue três linhas de acontecimentos. O primeiro deles é a fotossíntese.

**Figura 3:** Ciclo de carbono



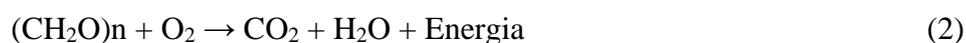
Fonte: Martins *et al.*, 2003.

Para isso, segundo Martins *et al.* (2003), é preciso entender que durante a fotossíntese (1), a reação química entre CO<sub>2</sub>, água e luz resulta em glicose e oxigênio. Quando a luz incide sobre uma molécula de clorofila, esta absorve parte da energia luminosa que permite a reação do gás carbônico com a água. Parte do CO<sub>2</sub> retirado das plantas retorna por meio da respiração (2). O restante é armazenado na forma de biomassa, pelas folhas, pelos caules, por raízes, etc., o que constitui a chamada Produção Primária Líquida (PPL). Portanto, as árvores tendem a se comportar como sumidouros naturais de carbono.

Fotossíntese:



Respiração:



Ao ser consumida, como alimento, por organismo heterotróficos, após a fixação de CO<sub>2</sub>, a biomassa é parcial e imediatamente reconvertida em CO<sub>2</sub> pela respiração, e, posteriormente,

por processos de decomposição da matéria orgânica, através da morte de animais, de plantas e de ataques por microrganismos.

Martins *et al.* (2003) explica que a fixação do CO<sub>2</sub> pelos oceanos ocorre através da dissolução do gás na água e por fotossíntese. Quando a temperatura é baixa, o gás carbônico é capturado pelos oceanos, e quando é alta, é liberado para a atmosfera. Martins *et al.* (2003) complementa a informação com o seguinte:

Assim, em regiões próximas ao equador, as águas quentes favorecem uma transferência maior do oceano para a atmosfera, enquanto em médias e altas latitudes predomina o processo inverso, em que CO<sub>2</sub> da atmosfera é dissolvido nas águas frias. Alguns modelos globais sugerem que há uma transferência líquida de CO<sub>2</sub> da atmosfera para os oceanos na faixa de  $2,0 \pm 0,8$  GtC/ano (MARTINS *et al.*, 2003, p. 31).

Assim, pode-se caracterizar os oceanos em locais de alta latitude como outro sumidouro de carbono, através da absorção do CO<sub>2</sub> que forma os carbonatos, ou, ainda, pela fixação do carbono pelo fitoplâncton.

Segundo Martins *et al.* (2003), uma das principais rotas de transferência do CO<sub>2</sub> para o fundo dos oceanos é a sedimentação de carbonato de cálcio insolúvel, CaCO<sub>3</sub>, na forma de organismos formadores de exoesqueletos, como conchas, moluscos, etc. Sua decomposição ao longo de milhões de anos leva à formação de depósitos ricos em hidrocarbonetos (petróleo) e carvão. Outra parte é redissolvida por processos químicos e biológicos, permanecendo como fração solúvel.

Mattos (2001) informa que outra maneira gerar carbono lançado na atmosfera são os depósitos de carvão, através de processos de combustão. Contribuem com isto os desmatamentos e as queimadas da cobertura vegetal terrestre. O carbono é muito relevante quando se trata de GEE, pela sua abrangência em relação à interferência do homem no ambiente. Exemplo disto são as queimadas e a produção agrícola, atividade de altas emissões de carbono.

### 3.4.3 Metano (CH<sub>4</sub>)

Das substâncias químicas reativas presentes na atmosfera, o metano é de longe o mais gás estufa mais abundante, depois de CO<sub>2</sub> e vapor d'água. Com uma concentração atual de 1,72 ppmv, mais da metade da concentração pré-industrial, apresenta um crescimento de 0,6%/ano (MATTOS, 2001). Em relação à atuação do metano na atmosfera, Martins *et al.* (2003) explica ser semelhante ao dióxido de carbono, e age de maneira a não permitir que os raios solares

absorvidos pela Terra durante o dia sejam devolvidos ao espaço, aumentando a temperatura da Terra.

Segundo site oficial da ONG *O Eco* (2014), o metano é produzido pela decomposição da matéria orgânica, cuja presença se destaca em aterros sanitários, lixões, reservatórios de hidrelétricas, entre a criação de gado (a pecuária representa 16% das emissões mundiais de gases de efeito estufa) e o cultivo de arroz. Parte também resulta da produção e distribuição de combustíveis fósseis (gás, petróleo e carvão).

Conforme Martins *et al.* (2003), as emissões de metano ocorrem a partir de vários processos, sobretudo da decomposição de matéria orgânica via mecanismos redutores, como a que ocorre no organismo de ruminantes (bovinos e caprinos) e de insetos (cupins). As principais atividades humanas responsáveis pela emissão de metano são a decomposição de lixo em aterros sanitários, a queima de biomassa, a mineração de carvão, o processamento de petróleo e a extração de gás natural.

A formação do gás se deve muito à fermentação por bactérias metanogênicas, microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbica (decomposição sem a presença de oxigênio), transformando matéria orgânica mais complexa em gás metano. Isto acontece também em tratamento de efluentes, nas lagoas anaeróbicas.

O principal mecanismo para a remoção do metano na troposfera envolve a oxidação via radical  $\text{OH}\cdot$ , mediante a abstração de um de seus átomos de hidrogênio e a formação de um radical  $\text{CH}_3\cdot$  e água, segundo a reação (3):



Martins *et al.* (2003) afirma que, ao ano, estima-se que sejam introduzidas na atmosfera entre 500 e 600 Mt de  $\text{CH}_4$  por diversas fontes, naturais ou antrópicas, enquanto são removidas de 460 a 580 Mt, principalmente via oxidação pelo radical  $\text{OH}\cdot$ .

O metano também está diretamente relacionado à ação do homem no ambiente, principalmente em função da decomposição orgânica em áreas de aterros e lixões, e pela atividade pecuária.

#### 3.4.4 Halocarbonos

Os halocarbonos compreendem os compostos químicos que possuem em sua estrutura moléculas de halogênios (principalmente cloro, flúor e bromo) e carbono (MATTOS, 2001). Segundo o site oficial do MCT (BRASIL, 2017), hidrofluorcarbonos (HFCs) são utilizados

como substitutos dos clorofluorcarbonos (CFCs) em aerossóis e refrigeradores. Perfluorcarbonos (PFCs) são utilizados como gases refrigerantes, solventes, propulsores, espuma e aerossóis.

Gases fluorados são frequentemente usados para substituir substâncias que destroem o ozônio estratosférico como, por exemplo, os clorofluorcarbonetos, os hidroclorofluorcarbonos e os halons. Tais gases são normalmente emitidos em quantidades menores e por vezes referidos como de alto potencial de aquecimento global. A degradação da camada de ozônio ocorre na estratosfera, onde a luz solar fotoliza esses compostos e libera átomos de cloro que reagem com o ozônio, diminuem sua concentração na atmosfera, e acabam por destruir a camada de ozônio. Primeiramente, ocorre a degradação do ozônio pela decomposição das moléculas de CFCs, por meio da radiação solar na estratosfera, conforme a reação (4).



Em seguida, os átomos de cloro liberados reagem com o ozônio, conforme a equação (5):

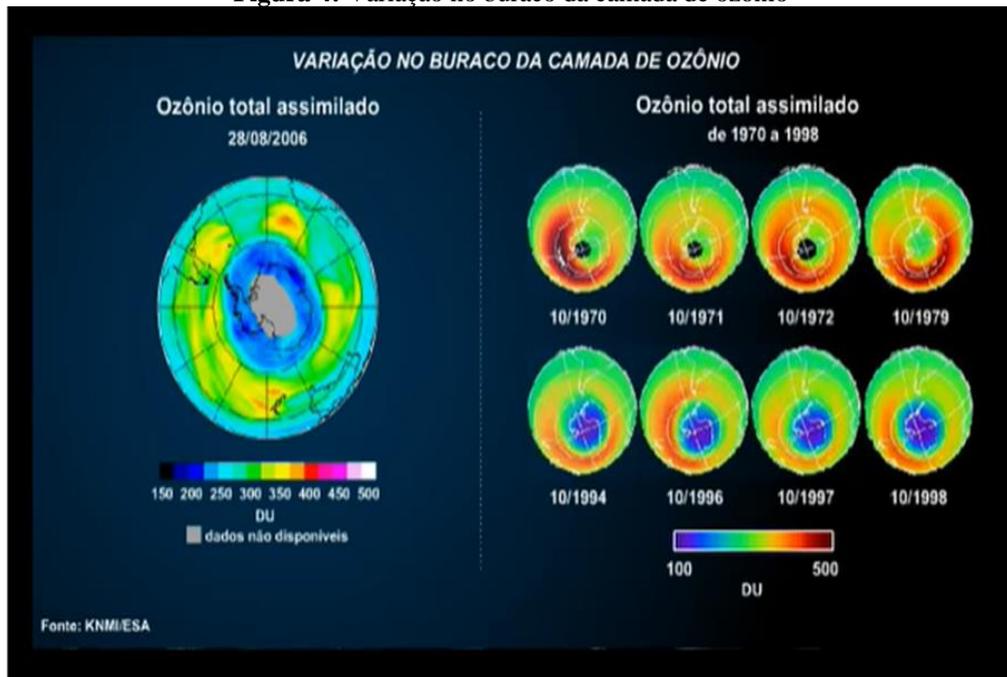


O ClO(g) formado reagirá novamente com os átomos livres de oxigênio, formando mais átomos de cloro, que por sua vez reagirão com o oxigênio e assim por diante, de acordo com a reação (6).



Como a reação dos átomos de cloro com o ozônio ocorre 1,5 mil vezes mais rápido do que a reação entre os átomos livres de oxigênio presentes na atmosfera, que decompõem o ozônio, há intensa destruição da camada de ozônio. Assim, um átomo de cloro pode destruir 100 moléculas de ozônio e formar um buraco na camada de ozônio, conforme a Figura 4.

**Figura 4:** Variação no buraco da camada de ozônio



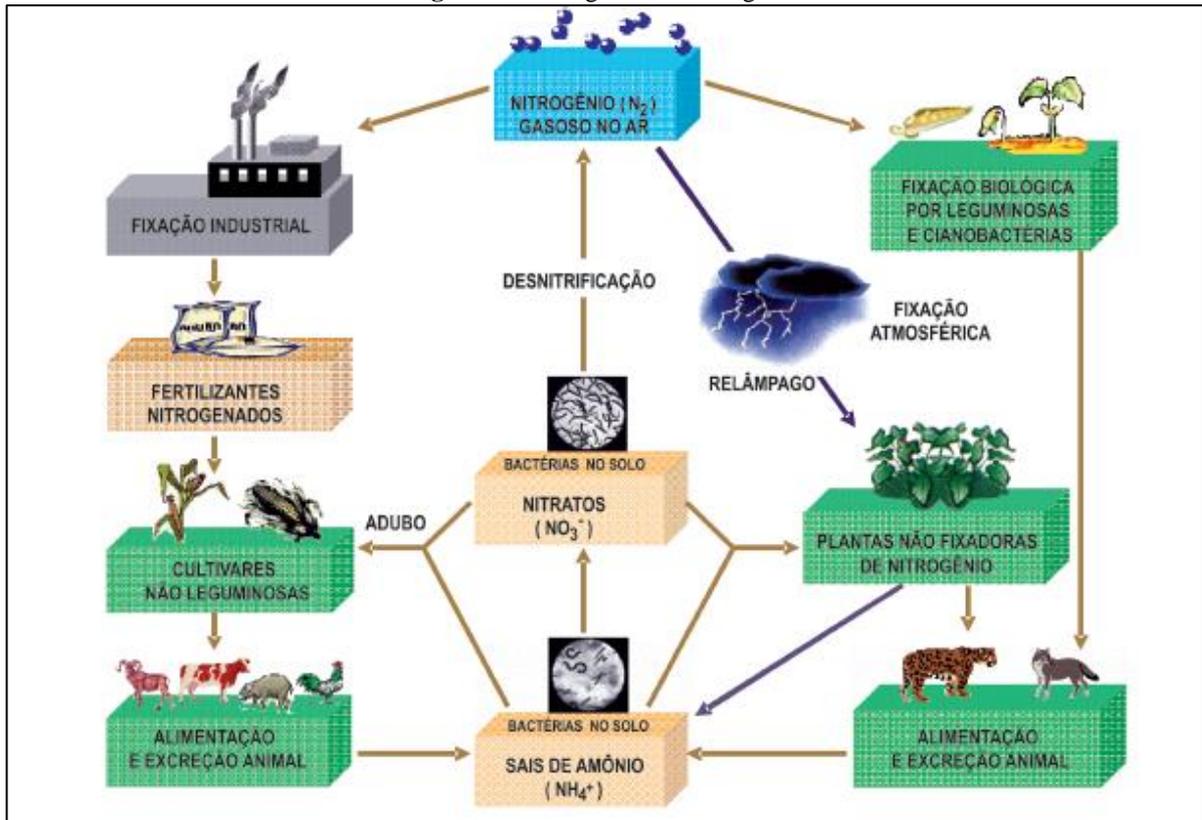
Fonte: KNMI/ESA, 2006.

Os halocarbonos são substâncias de processos químicos com finalidades produtivas e de processos. Existem substâncias no mercado que podem substituir em parte esses produtos para causar menos danos ao meio ambiente.

### 3.4.5 Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

De acordo com o site oficial do Ministério da Ciência e Tecnologia (BRASIL, 2017), a emissão de óxido nitroso é resultado, principalmente, do tratamento de dejetos animais, do uso de fertilizantes, da queima de combustíveis fósseis e de alguns processos industriais, e possui um poder de aquecimento global 310 vezes maior que o CO<sub>2</sub>. Os impactos gerados pelo óxido nitroso são semelhantes aos da ação dos halocarbonos na troposfera, que absorvem a energia térmica e na estratosfera, degradando a camada de ozônio, responsável por impedir a entrada dos raios ultravioletas. A Figura 5 mostra o ciclo global do Nitrogênio.

**Figura 5:** Ciclo global do nitrogênio



Fonte: Martins *et al.*, 2003.

Segundo Martins *et al.* (2003), o  $N_2O$  pode ser produzido naturalmente pelas florestas e pelos oceanos, e seu processo de emissão ocorre durante a desnitrificação do ciclo do nitrogênio. O nitrogênio ( $N_2$ ) presente na atmosfera é capturado por plantas e convertido em amônia ( $NH_3$ ), ou íons de amônio ( $NH_4^+$ ), em um processo chamado nitrificação. Essas substâncias são depositadas no solo e usadas posteriormente pelas plantas. A amônia depositada passa por processo de nitrificação e gera nitratos que, posteriormente, mediante processo de desnitrificação por microrganismos presentes no solo, transformam-se em nitrogênio gasoso ( $N_2$ ) e óxido nitroso ( $N_2O$ ), lançados à atmosfera.

A geração de  $N_2O$  também ocorre na agricultura, com a utilização de fertilizantes, nas produções de energia e industrial, bem como pela queima de biomassa. A interferência do homem em relação ao óxido nitroso está ligada a outros aspectos da agricultura, motivo da importância do entendimento do ciclo do nitrogênio.

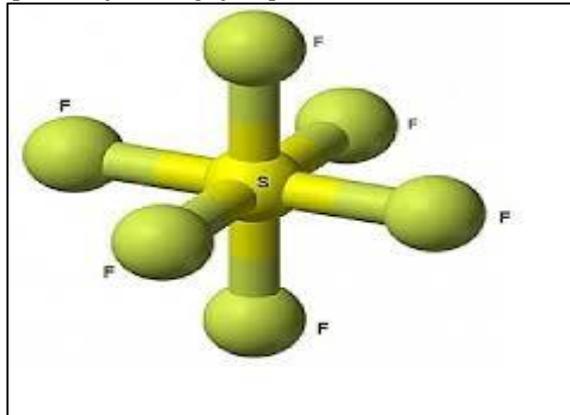
### 3.4.6 Hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ )

É um composto químico inorgânico formado pelos elementos enxofre e flúor, cuja fórmula química é  $SF_6$ . O composto é incolor, solúvel em álcool e éter, e pouco solúvel em

água. É um potente gás do efeito estufa e permanece por muito tempo na atmosfera (MATTOS, 2001).

Segundo Lira, Rodrigues e Mariano (2017), o potencial de aquecimento global desse gás é altíssimo: enquanto o potencial de aquecimento do metano é 21, o do hexafluoreto de enxofre chega a 23,900 vezes em relação ao dióxido de carbono. O SF<sub>6</sub> tem imensa representatividade em relação ao fator efeito estufa de vida longa, por sua grande capacidade de absorção das ondas de radiação terrestre, o que contribui significativamente para a intensificação do efeito. Além disso, trata-se de componente cuja decomposição na atmosfera pode durar até 3,200 anos. A Figura 6 mostra a representação da ligação química do hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>).

**Figura 6:** Representação da ligação química do Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>)



**Fonte:** Wikipédia, 2016.

Para Lira, Rodrigues e Mariano (2017) o hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) é um gás artificial amplamente utilizado em equipamentos elétricos de alta tensão. É incolor, inodoro, incombustível e quimicamente estável. Portanto, não reage com outras substâncias à temperatura ambiente, e sua alta estabilidade é baseada no conjunto simétrico perfeito dos seis átomos de flúor em torno do átomo de enxofre central.

### 3.5 Potencial de aquecimento global (GWP)

Para comparar as ações dos diferentes gases de efeito estufa no aquecimento global, criou-se o *Potencial de Aquecimento Global* — GWP, da sigla em inglês *Global Warming Potential*. O coeficiente do GWP é definido como o forçamento radiativo cumulativo entre o presente e algum horizonte de tempo causado por uma unidade de massa de gás emitido atualmente, expressado com relação a um gás de referência, tal como o CO<sub>2</sub> (MATTOS, 2001).

Além de depender do tipo de gás, o impacto pode diferir pela escala de tempo. Por exemplo, a permanência do CO<sub>2</sub> na atmosfera varia de 50 a 200 anos, dependendo de como o gás é absorvido pelos oceanos e pela biosfera, enquanto para o CH<sub>4</sub> a permanência varia de 12 a 17 anos.

Segundo a ABNT ISO 14064-1 (ABNT, 2017), para gerar métrica é utilizado o Potencial de Aquecimento Global, seguindo as equivalências conforme Tabela 1 para se chegar à unidade comum, o equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq).

**Tabela 1:** Gases e seus respectivos GWPs

GÁS	SÍMBOLO	GWP
DIÓXIDO DE CARBONO	CO <sub>2</sub>	1
METANO	CH <sub>4</sub>	21
ÓXIDO NITROSO	N <sub>2</sub> O	310
HIDROFLUOROCARBONOS	HFC-23	11.700
	HFC-125	2.800
	HFC-134 <sup>a</sup>	1.300
	HFC-143 <sup>a</sup>	3.800
	HFC-152 <sup>a</sup>	140
PERFLUORCARBONOS	CF <sub>4</sub>	6.500
	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9.200
HEXAFLUORETO DE ENXOFRE	SF <sub>6</sub>	23.900

Fonte: Brasil, 2017.

#### 4 Análise dos dados e oportunidades de minimização de impacto

Ao longo do desenvolvimento do trabalho observou-se que os gases elencados pelo protocolo de Kyoto têm comprovado influência sobre as mudanças climáticas em função do aquecimento global. Os gases de efeito estufa têm várias maneiras de provocar mudanças climáticas, mas sua principal atuação se baseia em duas características em relação ao aquecimento.

Uma delas funciona como uma cortina de gás que vai da superfície da Terra em direção ao espaço, impedindo que a energia do sol absorvida pela Terra durante o dia seja lançada de volta ao espaço, semelhante ao que foi visto anteriormente em relação ao dióxido de carbono, ao metano, e ao hexafluoreto de enxofre.

Os gases de efeito estufa também participam da destruição da camada de ozônio, responsável pela absorção dos raios ultravioleta que protege muitas formas de vida, como os plânctons, que produzem grande parte do oxigênio terrestre. A respeito dessa destruição, pode-se citar os halocarbonos e o óxido nitroso.

A partir do entendimento da química ambiental e da composição desses gases, é possível propor algumas situações para minimizar os impactos gerados por eles. O dióxido de carbono, apesar de ter a menor participação no efeito do aquecimento global, é mais comumente encontrado. Entretanto, visando a minimização dos prejuízos da emissão dos GEE, é inevitável falar em mudanças na matriz energética.

Se faz necessário evitar tipos de energia que liberem estes gases, principalmente de fontes de combustão, migrando para uma matriz energética mais limpa e renovável, tais como eólica, biomassa, energia das marés e solar, entre outras (O ECO, 2014, online).

Quando se fala em controle de emissões atmosféricas, o metano é o mais complicado, dadas suas características. A pecuária tem um papel significativo nessas emissões, de maneira que se devem buscar medidas para reduzir a produção de gás metano proveniente dos processos de digestão dos animais. Para isso, são necessárias pesquisas ligadas à melhoria na dieta do gado (nutrição que diminua perdas de nutrientes), à melhoria dos pastos (fertilização adequada dos solos) e outras medidas que resultem em uma produção mais limpa.

Nos lixões e aterros sanitários, a queima do metano assegura um benefício ambiental por transforma-lo em dióxido de carbono, visto que o GWP do metano aumenta 21 vezes em relação ao do carbono. Outra opção produtiva é o aproveitamento energético do metano liberado a partir do lixo para transformação em energia elétrica, por meio de usinas instaladas em aterros sanitários.

Para completar a lista dos gases que formam barreiras na atmosfera e promovem o aquecimento global, o hexafluoreto de enxofre é um dos que apresentam oportunidade de minimização. Isto, segundo Lira, Rodrigues e Mariano (2017), requer investimento em tecnologias para o setor elétrico associado a equipamentos com boas características dielétricas, e refrigerantes que não causem impacto ao meio ambiente.

Em relação aos gases com maior impacto sobre a camada de ozônio, segundo Martins *et al.* (2003), o óxido nitroso, cuja maior concentração está na agricultura, é um dos mais importantes, principalmente em razão do uso de fertilizantes em função do ciclo do nitrogênio. Este é um elemento vital para estruturas moleculares como enzimas, vitaminas, aminoácidos e até para o DNA. O nitrogênio está presente nos fertilizantes, contribui para o aumento e o rendimento das plantações, e, em contrapartida, gera emissão de N<sub>2</sub>O.

Para amenizar os impactos das emissões de N<sub>2</sub>O, existem algumas ações de caráter técnico, como a testagem periódica do mecanismo de distribuição de fertilizante para garantir a precisão da aplicação. Além disso, pode-se migrar de fertilizantes inorgânicos para

alternativos como, por exemplo, dejetos tratados de animais. Quanto a isto, também contribui a análise do solo para estabelecer a quantidade necessária de fertilizante, sem desperdícios.

Por fim, os halocarbonos, principalmente os CFCs, são substituídos pelos hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs) e hidrofluorcarbonetos (HFCs), que causam danos bem menores à estratosfera, embora também contribuam para o efeito estufa e para o aquecimento global. Ademais, são necessários estudos para identificar tecnologias para substituição desses gases, cujos efeitos são danosos ao meio ambiente.

## **5 Conclusão**

Esta pesquisa possibilitou o aprofundamento dos conhecimentos a respeito dos Gases de Efeito Estufa (GEE) listados no Protocolo de Kyoto, como o dióxido de carbono, o óxido nítrico, o metano, os halocarbonos e o hexafluoreto de enxofre, para compreensão de seus respectivos ciclos, sua formação, suas características e seu potencial de aquecimento global (GWP).

Acerca dos processos químicos envolvidos, a atuação desses gases se divide em duas particularidades de maior influência para o aquecimento global. Uma delas é a formação de uma barreira que não permite dispersar a energia do sol, especificamente formada pelos gases dióxido de carbono, metano, e pelo hexafluoreto de enxofre. A outra característica apontada foi a destruição da camada de ozônio por meio da ação dos gases óxido nítrico e halocarbonos.

Com essa avaliação, apresentaram-se algumas alternativas para reduzir o impacto gerado por tais gases, para se possa atuar tecnicamente na diminuição dos prejuízos resultantes do aquecimento global. Para tanto, é fundamental que o profissional entenda como os GEE interagem com ambiente, de modo que atue eficazmente para neutralização dos impactos. Por esta razão, alguns aspectos relevantes também foram apresentados em relação a esses impactos, principalmente a respeito das características ligadas ao potencial de aquecimento, bem como o tempo de duração do efeito desses gases, informações importantes do ponto de vista da conservação da Terra.

Portanto, a química ambiental é um norteador para a compreensão dos fenômenos ligados à química dos gases de efeito estufa, como da forma como se manifestam, sua influência na atmosfera e sobre o aquecimento global. Por este motivo, a humanidade deve se mobilizar para redução dessas emissões, ou pagará um alto preço pelo descaso ambiental.

## **Referências**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia metodológico para a realização de inventários em emissões de gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Disponível em: <https://www.abntonline.com.br/sustentabilidade/GHG/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14064 – 1 Gases de efeito estufa — Parte 1: especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Clima**. Brasília: MCT, 2017.

GEOMETRIA molecular octaédrica. *In*: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. 23 ago. 2016. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria\\_molecular\\_octa%C3%A9drica](https://pt.wikipedia.org/wiki/Geometria_molecular_octa%C3%A9drica). Acesso em: 6 ago. 2021.

GODOY, Arilda Schmidt. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **RAE-Revista de Administração de Empresas**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 20-29, 1995.

GLOBAL MONITORING LABORATORY. **NOAA's Annual Greenhouse Gas Index (An Introduction)**. [s.l.], 2017. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

LIRA, Marco Antonio Tavares; RODRIGUES, Larissa Mendes; MARIANO, Emerson. Impactos ambientais associados a utilização de gás SF<sub>6</sub> nos disjuntores de potência. *In*: THE 12TH LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION ON TRANSMISSION – GLAGTEE, 12., 2017, Guaratinguetá. **Anais...** Unesp: Guaratinguetá, 2017. p. 1-3. Disponível em: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/clagtee/2017/articles/24-006.pdf>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MARTINS, C. R. *et al.* Ciclos Globais de Carbono, Nitrogênio e Enxofre: a importância da química atmosférica. **Cadernos temáticos de química nova na escola**, São Paulo, n. 5, p. 28-41, nov. 2003. Disponível em: [http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/05/quimica\\_da\\_atmosfera.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/05/quimica_da_atmosfera.pdf). Acesso em: 6 ago. 2021.

MATTOS, L. B. Rego. **A Importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa** — o caso do município do Rio de Janeiro. 2001. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, abr. 2001.

MENDONÇA, F. Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: alguns Indicadores da região sul. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 2, p. 71-86, dez. 2006. Disponível em: <http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25388/17013>. Acesso em: 6 ago. 2021.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero. **Desmistificando o aquecimento global**. Maceió: Instituto de Ciências Atmosféricas; Universidade Federal de Alagoas. 2013. Disponível em: [https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/molion\\_desmist.pdf](https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/molion_desmist.pdf). Acesso em: 6 ago. 2021.

O ECO. **Gases do efeito estufa**: dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) e Metano (CH<sub>4</sub>). Dicionário Ambiental. O eco, Rio de Janeiro, abr. 2014. Disponível em: <https://www.oeco.org.br/dicionario-ambiental/28261-gases-do-efeito-estufa-dioxido-de-carbono-co2-e-metano-ch4/>. Acesso em: 6 ago. 2021.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate change**. 1990.

ROYAL NETHERLANDS METEOROLOGICAL INSTITUTE — KNMI, THE EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Variação no buraco da camada de ozônio**. [s.l.], 2006. Disponível em: [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Thanks\\_to\\_ESA\\_KNMI\\_offers\\_a\\_UV\\_forecasting\\_Service](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Thanks_to_ESA_KNMI_offers_a_UV_forecasting_Service) Acesso em: 6 ago. 2021.

VIOLA, Eduardo. O Brasil e o Protocolo de Quioto. **Eco 21**, Rio de Janeiro, [s.d.]. Disponível em: <http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=310>. Acesso em: 6 ago. 2021.