

DOI: <https://doi.org/10.36470/famen.2026.r7a07>

Recebido em: 20/05/2026

Aceito em: 27/05/2026

**CONHECIMENTOS DA FÍSICA PARA EXPLICAR O EFEITO ESTUFA: UM ESTUDO NA LICENCIATURA EM FÍSICA DO IFRN CAMPUS SANTA CRUZ**

**KNOWLEDGE OF PHYSICS TO EXPLAIN THE GREENHOUSE EFFECT: A STUDY IN THE PHYSICS DEGREE PROGRAM AT IFRN SANTA CRUZ CAMPUS**

**Ellen Ádila da Rocha Xavier**

Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-0802-6960>

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/6137925653358245>

Licenciada em Física

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Brasil

E-mail: [ellenrocham@outlook.com](mailto:ellenrocham@outlook.com)

**Lenina Lopes Soares Silva**

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0517-4742>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1487610808390702>

Doutora em Ciências da Educação

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Brasil

E-mail: [lenina.lopes@ifrn.edu.br](mailto:lenina.lopes@ifrn.edu.br)

**Roney Roberto de Melo Sousa**

<https://orcid.org/0000-0002-1466-9130>

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6303974202811886>

Mestre em Ensino de Física

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do RN, Brasil

E-mail: [roney.melo@ifrn.edu.br](mailto:roney.melo@ifrn.edu.br)

**RESUMO**

O efeito estufa é um fenômeno físico-natural fundamental para a manutenção do equilíbrio térmico na Terra, pois possibilita as condições adequadas à existência da vida. Neste estudo, problematiza-se a intensificação do efeito estufa nas últimas décadas do século XX e nas primeiras do século XXI. Objetiva-se analisar os fundamentos físicos do efeito estufa, enfatizando princípios da Física que explicam a interação entre radiação eletromagnética e gases atmosféricos, bem como a distinção entre o efeito estufa natural daquele intensificado pela ação antrópica. A pesquisa caracteriza-se como bibliográfica, com abordagem qualitativa, fundamentada na análise interpretativa de livros, artigos científicos e relatórios técnicos reconhecidos na área de Física sobre o clima. O estudo apresenta os principais gases do efeito estufa e aborda o papel do efeito natural para o equilíbrio térmico do planeta, relacionando-o

ao balanço energético da Terra e aos mecanismos de retroalimentação climática. Conclui-se que o aquecimento global contemporâneo é caracterizado pela rapidez das alterações observadas, sendo amplamente atribuído à ação humana.

**Palavras-chave:** Aquecimento global; efeito estufa; física atmosférica; gases de efeito estufa; mudanças climáticas.

## ABSTRACT

The greenhouse effect is a fundamental physical-natural phenomenon for maintaining thermal balance on Earth, as it provides the conditions suitable for the existence of life. This study problematizes the intensification of the greenhouse effect in the last decades of the 20th century and the first decades of the 21st century. The objective is to analyze the physical foundations of the greenhouse effect, emphasizing principles of Physics that explain the interaction between electromagnetic radiation and atmospheric gases, as well as the distinction between the natural greenhouse effect and that intensified by human activity. The research is characterized as bibliographic, with a qualitative approach, based on the interpretative analysis of books, scientific articles, and recognized technical reports in the field of Physics on climate. The study presents the main greenhouse gases and addresses the role of the natural effect in the planet's thermal balance, relating it to the Earth's energy balance and climate feedback mechanisms. It concludes that contemporary global warming is characterized by the speed of the observed changes, being largely attributed to human activity.

**Keywords:** Global warming; greenhouse effect; atmospheric physics; greenhouse gases; climate change.

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um fenômeno físico-natural essencial para a manutenção da vida na Terra, posto que regula a temperatura média do planeta ao permitir a retenção de parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Sem esse mecanismo, a temperatura média global seria significativamente inferior, inviabilizando os sistemas biológicos tal como são conhecidos. Nas últimas décadas, a intensificação desse fenômeno, associada principalmente ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa provenientes de atividades antrópicas, tem se consolidado como um dos principais desafios científicos, ambientais e sociais da contemporaneidade, despertando amplo interesse científico e social e tornando-se um tema relevante para o ensino de Física.

Na literatura da área de Física, o efeito estufa está fundamentado nas interações entre radiação eletromagnética e matéria, especialmente nos processos de absorção e emissão de

energia por gases atmosféricos. A compreensão desses mecanismos físicos é fundamental para a análise das mudanças climáticas atuais, pois permite diferenciar o efeito estufa natural, indispensável ao equilíbrio térmico do planeta, de sua intensificação decorrente das ações humanas. Estudos consolidados na climatologia física demonstram que o aquecimento global contemporâneo apresenta características distintas das variações climáticas naturais ocorridas ao longo da história geológica da Terra (Hartmann, 2016).

Apesar do amplo consenso científico acerca da realidade do aquecimento global e de sua relação com a intensificação do efeito estufa, o tema ainda é alvo de desinformação e de discursos céticos que desconsideram evidências empíricas e modelos físicos consolidados. Cook (2016) destaca que a negação científica frequentemente se apoia em interpretações equivocadas de dados ou na descontextualização de fenômenos naturais, reforçando a importância da divulgação científica baseada em evidências com rigor metodológico.

O presente artigo tem como objetivo geral analisar os fundamentos físicos do efeito estufa, enfatizando os princípios da Física que explicam sua ocorrência e intensificação, notadamente nos últimos cinquenta anos. Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, com abordagem qualitativa, fundamentada na análise interpretativa de livros, artigos científicos e documentos acadêmicos que tratam do efeito estufa sob a perspectiva da Física e da Climatologia. Para Gil (2008), a pesquisa bibliográfica permite o contato direto do pesquisador com produções já consolidadas, possibilitando a construção de análises fundamentadas em teorias e práticas estabelecidas. Lakatos e Marconi (2017) ressaltam que a abordagem qualitativa busca compreender fenômenos em sua complexidade, valorizando a interpretação dos dados e a articulação entre diferentes perspectivas teóricas.

Trata-se de um estudo desenvolvido como trabalho de conclusão do curso de Licenciatura em Física do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Campus Santa Cruz. O trabalho buscou responder às seguintes questões norteadoras: quais leis da Física explicam como a Terra retém calor? As propriedades moleculares dos gases influenciam o aquecimento global, e como isso ocorre? Há diferença entre efeito estufa natural e antrópico? O artigo está organizado em três seções, além desta introdução, incluindo as considerações finais.

## 2 O EFEITO ESTUFA EM UMA VISÃO CIENTÍFICA NO CAMPO DA FÍSICA

O efeito estufa encontra-se cientificamente fundamentado nos princípios da Física que regem a propagação da radiação eletromagnética e sua interação com a matéria. A principal fonte de energia do sistema climático terrestre é o Sol, que emite radiação predominantemente de onda curta, abrangendo o espectro ultravioleta, visível e parte do infravermelho próximo. Ao atingir a atmosfera terrestre, parte dessa radiação é refletida de volta ao espaço, enquanto outra parcela é absorvida pela superfície do planeta, o que promove o aquecimento terrestre (Trenberth; Fasullo; Kiehl, 2009).

A Terra, uma vez aquecida em sua superfície, passa a emitir energia em forma de radiação infravermelha de onda longa. Esse processo é descrito pela Lei de Stefan-Boltzmann, na qual a energia irradiada por um corpo é proporcional à quarta potência de sua temperatura absoluta, expressa pela equação  $E = \sigma T^4$ , em que  $\sigma$  representa a constante de Stefan-Boltzmann. Essa lei é fundamental para compreender o balanço energético da Terra e o papel da atmosfera na retenção de calor (Petty, 2006).

A distribuição espectral da radiação emitida por um corpo pode ser explicada pela Lei do Deslocamento de Wien, que estabelece que o comprimento de onda de emissão máxima é inversamente proporcional à temperatura do corpo emissor. Assim, o Sol, com temperatura superficial elevada, emite majoritariamente radiação de onda curta, enquanto a Terra, com temperatura média inferior, emite radiação concentrada no infravermelho. Essa diferença espectral é crucial para o funcionamento do efeito estufa (Goody; Yung, 1989).

**Figura 1** – Representação visual do efeito estufa



Fonte: Toda Matéria (2018).

Os gases de efeito estufa exercem papel central nesse processo ao absorverem seletivamente a radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. Moléculas como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o vapor d'água possuem modos vibracionais e rotacionais capazes de interagir com a radiação infravermelha. Tal absorção ocorre quando a energia da radiação coincide com os níveis energéticos dessas moléculas, conforme descrito pela mecânica quântica aplicada à espectroscopia molecular (Wallace; Hobbs, 2006).

Nessa perspectiva, Pierrehumbert (2010, p. 45) destaca que:

[...] Não se trata de um aprisionamento literal de calor, mas de um atraso na perda de energia do sistema Terra-atmosfera para o espaço. Após a absorção da radiação infravermelha, os gases de efeito estufa reemitem energia em todas as direções, inclusive de volta para a superfície terrestre. Esse processo de reemissão contribui para o aumento da temperatura média da baixa atmosfera, caracterizando o efeito estufa.

O conceito de balanço radiativo é essencial para a compreensão do efeito estufa. Em equilíbrio, a energia recebida pelo sistema terrestre deve ser aproximadamente igual à energia emitida de volta ao espaço. Alterações na composição atmosférica, como o aumento da concentração de gases de efeito estufa, provocam um desequilíbrio nesse balanço, resultando em um forçamento radiativo positivo. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) define o forçamento radiativo como a variação no fluxo de energia causada por mudanças em fatores climáticos externos ao sistema (IPCC, 2021).

Do ponto de vista da Física, é importante destacar que gases majoritários da atmosfera, como o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e o oxigênio ( $\text{O}_2$ ), não contribuem significativamente para o efeito estufa. Isso ocorre porque essas moléculas diatômicas homonucleares não apresentam variação de momento dipolar durante suas vibrações, o que impede a absorção eficiente de radiação infravermelha. Essa explicação evidencia a relevância das propriedades moleculares na dinâmica climática (Petty, 2006).

A Física estatística e a termodinâmica também oferecem subsídios importantes para a compreensão do efeito estufa. Nesses campos, ressalta-se que o aumento da temperatura média do sistema atmosférico implica maior energia cinética média das moléculas, influenciando processos como convecção, circulação atmosférica e distribuição de umidade. Esses processos atuam como mecanismos de redistribuição de energia no sistema climático (Hartmann, 2016).

O vapor d'água desempenha um papel singular no efeito estufa por atuar como importante mecanismo de retroalimentação positiva. O aumento da temperatura favorece maior evaporação, elevando a concentração de vapor d'água na atmosfera, que, por sua vez, intensifica a absorção de radiação infravermelha. Segundo Held e Soden (2000), esse feedback amplifica o aquecimento inicial causado por outros gases, como o CO<sub>2</sub>, reforçando a complexidade do sistema climático.

A compreensão dos fundamentos físicos do efeito estufa evidencia que o fenômeno é amplamente sustentado por leis bem estabelecidas da Física, não sendo uma hipótese meramente especulativa, mas um processo mensurável e modelável. Cook et al. (2016) destacam que o entendimento científico do efeito estufa resulta da convergência entre observações empíricas, experimentos laboratoriais e modelos teóricos, reforçando a robustez do conhecimento científico que fundamenta as discussões contemporâneas sobre mudanças climáticas.

## **2.1 AS PROPRIEDADES MOLECULARES DOS GASES DE EFEITO ESTUFA**

Os gases de efeito estufa (GEE) são componentes atmosféricos que têm a capacidade de absorver e reemitir radiação infravermelha, desempenhando papel fundamental na regulação térmica do planeta Terra. De acordo com Wallace e Hobbs (2006, p. 16), a compreensão dessas propriedades é essencial para explicar por que determinados gases contribuem para o efeito estufa enquanto outros, mais abundantes, não apresentam esse comportamento. Essa propriedade não está relacionada à quantidade absoluta desses gases na atmosfera, mas às suas características moleculares, especialmente à estrutura e aos modos vibracionais que permitem a interação com a radiação eletromagnética.

A absorção de radiação infravermelha ocorre quando a frequência da radiação incidente coincide com os modos vibracionais e rotacionais da molécula. Moléculas que apresentam variação de momento dipolar durante suas vibrações são capazes de interagir com o infravermelho, conforme descrito pela espectroscopia molecular e pela mecânica quântica. Para Goody e Yung (1989), essa interação é a base física do efeito estufa e explica a eficiência radiativa de gases como o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub>.

O dióxido de carbono é um dos principais gases de efeito estufa devido à sua estabilidade química, longa permanência na atmosfera e capacidade de absorver radiação infravermelha em bandas específicas, especialmente em torno de 15  $\mu\text{m}$ . Embora sua concentração seja relativamente baixa, o  $\text{CO}_2$  exerce influência significativa no balanço radiativo da Terra, funcionando como regulador climático de longo prazo (Pierrehumbert, 2010).

O metano ( $\text{CH}_4$ ), presente em menores concentrações que o  $\text{CO}_2$ , apresenta um potencial de aquecimento global significativamente maior em escalas de tempo mais curtas. Sua estrutura molecular tetraédrica permite múltiplos modos vibracionais ativos no infravermelho, tornando-o altamente eficiente na absorção de energia. De acordo com o IPCC (2021), o metano é responsável por uma parcela expressiva do forçamento radiativo antropogênico, especialmente em períodos de 20 a 100 anos.

O óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), associado principalmente às atividades agrícolas e industriais, possui longa vida média na atmosfera, podendo ultrapassar um século. Contribui de forma significativa para o aquecimento global, além de participar de reações químicas que afetam a camada de ozônio (Hartmann, 2016). O vapor d'água é o gás de efeito estufa mais abundante e eficiente na atmosfera, responsável pela maior parte do efeito estufa natural. Diferente dos demais gases, sua concentração não é controlada diretamente por emissões antrópicas, mas pela temperatura do sistema climático, atuando principalmente como mecanismo de retroalimentação positiva (Held; Soden, 2000).

**Figura 2** – Gases do efeito estufa e suas fontes de origem



Fonte: Trilho Ambiental (2021).

A ausência de contribuição significativa de gases como o nitrogênio ( $N_2$ ) e o oxigênio ( $O_2$ ) para o efeito estufa está relacionada às suas propriedades moleculares. Por serem moléculas diatômicas homonucleares, não apresentam momento dipolar variável durante suas vibrações, o que impede a absorção efetiva de radiação infravermelha. Essa explicação, baseada na mecânica quântica, reforça a ideia de que o efeito estufa é um fenômeno rigorosamente fundamentado em leis físicas (Petty, 2006). Além disso, a sobreposição espectral entre diferentes bandas de absorção também influencia o impacto climático dos GEE, devendo ser considerada nos modelos climáticos (Goody; Yung, 1989).

## **2.2 O EFEITO ESTUFA NATURAL E O EQUILÍBRIO TÉRMICO NA TERRA**

O efeito estufa natural é um fenômeno físico essencial para a manutenção do equilíbrio térmico da Terra, pois permite que o planeta apresente condições compatíveis com a existência de vida. Sem a presença de gases capazes de absorver e reemitir radiação infravermelha, a energia recebida do Sol seria rapidamente devolvida ao espaço, resultando em temperaturas médias significativamente mais baixas. Estudos clássicos indicam que, na ausência do efeito estufa, a temperatura média global seria aproximadamente  $-18\text{ }^\circ\text{C}$ , em contraste com a média atual de cerca de  $15\text{ }^\circ\text{C}$  (Hartmann, 2016).

O equilíbrio térmico da Terra é estabelecido quando a energia solar absorvida pelo sistema terrestre se iguala à energia emitida de volta ao espaço. A presença da atmosfera e de gases de efeito estufa modifica esse balanço, elevando a temperatura de equilíbrio da superfície por meio da absorção seletiva da radiação infravermelha (Petty, 2006). Trenberth, Fasullo e Kiehl (2009, p. 56) informam que:

[...] O efeito estufa natural atua em conjunto com esses mecanismos dinâmicos, garantindo uma distribuição térmica relativamente estável em escala global. A radiação solar incidente apresenta maior intensidade nas regiões equatoriais, enquanto as regiões polares recebem menor quantidade de energia. Esse gradiente energético contribui para a circulação atmosférica e oceânica, responsáveis pela redistribuição do calor no planeta.

O vapor d'água desempenha papel central no efeito estufa natural, sendo responsável por grande parte da absorção de radiação infravermelha na atmosfera. Sua concentração está

fortemente associada à temperatura do ar, estabelecendo uma relação de equilíbrio dinâmico entre evaporação e condensação. Held e Soden (2000) destacam que o vapor d'água funciona como regulador térmico natural, amplificando ou atenuando variações térmicas conforme as condições ambientais.

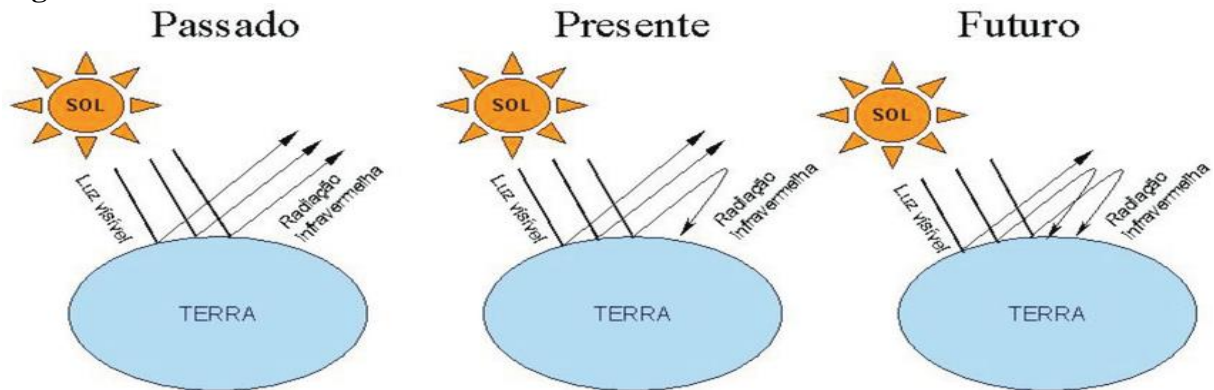
De acordo com Pierrehumbert (2010, p. 32), a interação entre os feedbacks climáticos é fundamental para a estabilidade do clima terrestre ao longo do tempo. Feedbacks positivos, como o aumento do vapor d'água, podem intensificar o aquecimento inicial, enquanto feedbacks negativos, como o aumento da refletividade devido à formação de nuvens, podem atuar como mecanismos de estabilização. O albedo da Terra também constitui fator relevante: superfícies claras, como gelo e neve, refletem grande parte da radiação incidente, enquanto superfícies mais escuras absorvem maior quantidade de energia (Hartmann, 2016).

A estabilidade do efeito estufa natural ao longo de milhões de anos evidencia a capacidade autorreguladora do sistema climático terrestre. Processos geológicos, como o intemperismo químico das rochas e o ciclo do carbono, agem como mecanismos de longo prazo que controlam as concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico (Walker; Hays; Kasting, 1981). É importante salientar que o efeito estufa natural não deve ser confundido com sua intensificação antrópica. Enquanto o primeiro é um fenômeno essencial e equilibrado, o segundo resulta de alterações rápidas na composição atmosférica, principalmente a partir da Revolução Industrial (Cook *et al.*, 2016).

### **2.3 INTENSIFICAÇÃO DO EFEITO ESTUFA E AÇÃO ANTRÓPICA**

A intensificação do efeito estufa está diretamente associada às atividades humanas, especialmente a partir da Revolução Industrial, período marcado pelo uso crescente de combustíveis fósseis e pelo aumento significativo das emissões de gases de efeito estufa. Esse processo resultou em alterações rápidas e sem precedentes na composição atmosférica, rompendo o equilíbrio natural mantido ao longo de milhares de anos. Segundo o IPCC (2021), o aumento das concentrações de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso desde o século XIX é inequivocamente atribuído à ação antrópica.

**Figura 3** – O efeito estufa no futuro



Fonte: ResearchGate (2019).

A intensificação do efeito estufa ocorre devido ao aumento da capacidade da atmosfera de absorver radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre. O acréscimo de gases com propriedades radiativas ativas amplia o forçamento radiativo positivo, reduzindo a quantidade de energia que escapa para o espaço. Myhre et al. (2013) destacam que o CO<sub>2</sub> é o principal responsável por esse forçamento, devido à sua elevada concentração, persistência atmosférica e eficiência na absorção de infravermelho.

Medições diretas da concentração de CO<sub>2</sub>, iniciadas sistematicamente com os registros de Mauna Loa, revelam crescimento contínuo desde a década de 1950. Keeling et al. (1976) demonstraram que esse aumento não pode ser explicado apenas por variabilidade natural, estando fortemente associado à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento. Além do CO<sub>2</sub>, o metano tem apresentado crescimento acelerado nas últimas décadas, impulsionado por atividades agropecuárias e exploração de combustíveis fósseis (IPCC, 2021).

Santer et al. (2013, p. 34) afirmam que o comportamento vertical da temperatura atmosférica constitui uma assinatura física clara do aquecimento de origem antrópica. Estudos baseados em dados de satélite indicam aumento na retenção de radiação infravermelha na atmosfera, bem como aquecimento da troposfera e resfriamento da estratosfera, padrão consistente com o aumento dos gases de efeito estufa. Modelos climáticos demonstram que as variações climáticas observadas desde meados do século XX só podem ser reproduzidas quando os forçamentos antrópicos são incluídos (Knutti et al., 2019).

As mudanças no uso da terra, como o desmatamento e a urbanização, também contribuem para a intensificação do efeito estufa, tanto pela liberação de carbono armazenado na biomassa quanto pela alteração do albedo da superfície terrestre. Bonan (2008) destaca que

essas modificações afetam os fluxos de energia e de carbono, ampliando os impactos climáticos das emissões diretas de gases de efeito estufa. Stern (2007) ressalta que os custos da inação frente às mudanças climáticas superam amplamente os investimentos necessários para mitigação e adaptação.

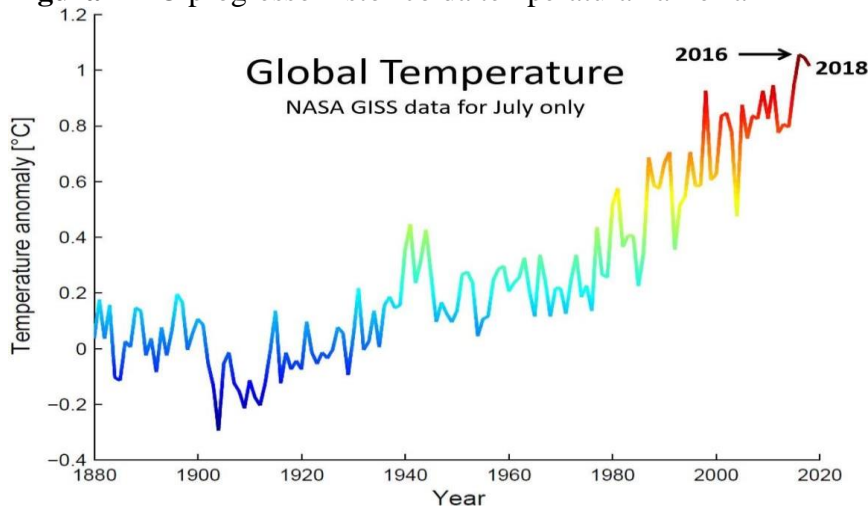
## **2.4 EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CLIMA DA TERRA**

A história climática da Terra é marcada por variações significativas ocorridas ao longo de bilhões de anos, resultantes de processos naturais complexos que envolvem interações entre a atmosfera, os oceanos, a biosfera e a litosfera. Evidências geológicas, como registros sedimentares, fósseis e análises isotópicas, indicam que o clima terrestre passou por períodos de aquecimento e resfriamento muito antes da presença humana. Segundo Ruddiman (2014), essas mudanças refletem a dinâmica natural do sistema climático em diferentes escalas de tempo.

Hoffman e Schrag (2002, p. 79) destacam que, durante o Pré-Cambriano, o planeta apresentou condições climáticas extremas, incluindo episódios conhecidos como "Terra Bola de Neve", nos quais grande parte da superfície terrestre esteve coberta por gelo. Esses eventos são associados a variações na concentração de gases atmosféricos, na atividade vulcânica e na luminosidade solar. O efeito estufa desempenhou papel crucial no término desses períodos glaciais, ao permitir o acúmulo de CO<sub>2</sub> na atmosfera e o consequente aquecimento global.

Nos últimos milhões de anos, o clima terrestre foi dominado por ciclos glaciais e interglaciais, especialmente durante o Quaternário. Esses ciclos estão fortemente associados às variações orbitais da Terra, conhecidas como ciclos de Milankovitch, que afetam a distribuição da radiação solar recebida pelo planeta. Berger (1988) explica que mudanças na excentricidade, obliquidade e precessão orbital influenciam o avanço e o recuo das calotas polares. Registros de núcleos de gelo da Antártica e da Groenlândia revelam correlações estreitas entre CO<sub>2</sub> e temperatura ao longo dos ciclos glaciais: embora as variações orbitais iniciem os ciclos, os gases de efeito estufa atuam como amplificadores das mudanças climáticas (Petit et al., 1999).

**Figura 4** – O progresso histórico da temperatura na Terra



**Fonte:** Revista Galileu (O Globo) (2020).

O aquecimento global contemporâneo apresenta características distintas das mudanças climáticas naturais do passado, sobretudo em relação à rapidez e à magnitude das variações observadas. Evidências paleoclimáticas indicam que as taxas atuais de aumento da temperatura e das concentrações de CO<sub>2</sub> são significativamente superiores às registradas nos últimos milhares de anos. Conforme ressaltado pelo IPCC (2021), não há precedentes recentes para as mudanças observadas no clima atual sem a influência humana.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisaram-se os fundamentos físicos do efeito estufa com a finalidade de evidenciar que se trata de um fenômeno natural, indispensável para o equilíbrio térmico da Terra e para a manutenção da vida. Os princípios da Física, como a interação entre radiação eletromagnética e matéria, permitem compreender os mecanismos que explicam a absorção e a reemissão da radiação infravermelha pelos gases atmosféricos, afastando interpretações simplistas ou equivocadas sobre o funcionamento do sistema climático terrestre.

Ao longo do estudo, destacou-se o papel das propriedades moleculares dos gases de efeito estufa e sua influência direta no balanço radiativo do planeta. A análise do efeito estufa natural, associada à evolução histórica do clima da Terra, permitiu compreender que variações climáticas sempre ocorreram, porém em escalas temporais longas e reguladas por processos

naturais complexos. Em contraste, a intensificação recente do efeito estufa apresenta características inéditas, especialmente no que se refere à velocidade das mudanças observadas.

As evidências científicas discutidas, provenientes de observações empíricas, registros paleoclimáticos e modelagens físicas, reforçam o consenso de que a ação antrópica desempenha papel central no aquecimento global contemporâneo. A contribuição de autores como John Cook e de relatórios do IPCC evidencia a importância da Física como base para o enfrentamento do ceticismo climático e para a consolidação de uma compreensão científica rigorosa sobre as mudanças climáticas.

Conclui-se que as leis de Stefan-Boltzmann e Wien, aliadas à mecânica quântica aplicada à espectroscopia molecular, oferecem o arcabouço teórico necessário para diferenciar o mecanismo natural de regulação climática de sua intensificação acelerada provocada por atividades humanas. O aquecimento global contemporâneo é um fato cientificamente comprovado e mensurável, o que reforça sua relevância para o ensino de Física, contribuindo para combater o ceticismo climático e para o entendimento de que as rápidas transformações ambientais iniciadas após a Revolução Industrial afetam diretamente a vida na Terra.

## REFERÊNCIAS

BERGER, A. L. Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic changes. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 35, n. 12, p. 2362–2367, 1988.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. **Science**, v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, 2008.

COOK, J. **O guia científico do ceticismo quanto ao aquecimento global**. São Paulo: Editora XYZ, 2016.

COOK, J. *et al.* Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming. *Environmental Research Letters*, v. 11, n. 4, p. 1–7, 2016.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOODY, R. M.; YUNG, Y. L. **Atmospheric radiation: theoretical basis**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1989.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2016.

HELD, I. M.; SODEN, B. J. Water vapor feedback and global warming. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 25, p. 441–475, 2000.

HOFFMAN, P. F.; SCHRAG, D. P. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. **Terra Nova**, v. 14, n. 3, p. 129–155, 2002.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KEELING, C. D. *et al.* Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii. **Tellus**, v. 28, n. 6, p. 538–551, 1976.

KNUTTI, R. *et al.* A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 4, p. 1909–1918, 2017.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MANN, M. E. *et al.* Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. **Science**, v. 326, n. 5957, p. 1256–1260, 2009.

MYHRE, G. *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing. *In: IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 659–740.

PETIT, J. R. *et al.* Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. **Nature**, v. 399, p. 429–436, 1999.

PETTY, G. W. **A first course in atmospheric radiation**. Madison: Sundog Publishing, 2006.

PIERREHUMBERT, R. T. **Principles of planetary climate**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

RUDDIMAN, W. F. **Earth's climate: past and future**. 3. ed. New York: W. H. Freeman and Company, 2014.

SANTER, B. D. *et al.* Identifying human influences on atmospheric temperature. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 1, p. 26–33, 2013.

STERN, N. **The economics of climate change: the Stern review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

TRENBERTH, K. E.; FASULLO, J. T.; KIEHL, J. Earth's global energy budget. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 3, p. 311–323, 2009.

WALKER, J. C. G.; HAYS, P. B.; KASTING, J. F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. C10, p. 9776–9782, 1981.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science**: an introductory survey. 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 2006.