

# Alterações climáticas e o Sistema Terrestre

## CITAÇÃO

Bertolami, O., Francisco, F. (2020)  
Alterações climáticas e o Sistema Terrestre,  
*Rev. Ciência Elem.*, V8(04):051.  
[doi.org/10.24927/rce2020.051](https://doi.org/10.24927/rce2020.051)

## EDITOR

José Ferreira Gomes,  
Universidade do Porto

## EDITOR CONVIDADO

João Lopes dos Santos  
Universidade do Porto

## RECEBIDO EM

01 de novembro de 2020

## ACEITE EM

02 de novembro de 2020

## PUBLICADO EM

15 de dezembro de 2020

## COPYRIGHT

© Casa das Ciências 2020.  
Este artigo é de acesso livre, distribuído sob licença Creative Commons com a designação [CC-BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), que permite a utilização e a partilha para fins não comerciais, desde que citado o autor e a fonte original do artigo.

[rce.casadasciencias.org](https://rce.casadasciencias.org)



Orfeu Bertolami, Frederico Francisco  
DFA/ Universidade do Porto

Segundo o “Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas” (IPCC), criado em 1988 sob a chancela da Organização Meteorológica Mundial e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, mudança ou alteração climática é uma variação a longo prazo, à escala da vida humana, estatisticamente significativa, dos parâmetros climáticos (temperatura, precipitação, ventos, nebulosidade e outros fenómenos climáticos) relativamente às médias históricas. Assim, entende-se que as alterações climáticas se referem à variação do clima à escala global, ou dos climas regionais da Terra durante um período que pode ir de décadas a milhões de anos.

Há um consenso científico generalizado de que as alterações climáticas observadas atualmente são devidas, direta ou indiretamente, à atividade humana que, desde o início da industrialização, começou a alterar significativamente a composição da atmosfera e a ocupação e utilização da superfície do planeta.

Há, no entanto, que salientar que o clima da Terra sempre sofreu alterações ao longo do tempo devido a causas naturais, sejam elas internas à Terra (vulcanismo, deriva dos continentes, movimentação de placas tectónicas, formação de montanhas, etc.) ou de origem astronómica (ciclos solares, variação dos parâmetros orbitais, impacto de meteoritos, etc.).

## O Efeito de Estufa

Em termos médios, a temperatura da Terra depende do balanço entre a energia que a Terra recebe do Sol e aquela que emite de volta para o espaço. Existem alguns gases que, estando presentes na atmosfera, absorvem a radiação infravermelha proveniente do Sol e, sobretudo, a emitida pela superfície da Terra, e a voltam a emitir em todas as direções, contribuindo para que parte dessa energia seja absorvida pela superfície da Terra, em vez de ser refletida para o espaço. Esses gases são conhecidos como gases de efeito de estufa e incluem o vapor de água (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e ozono (O<sub>3</sub>), CFCs e outros. A presença natural destes gases, mesmo antes da Revolução Industrial, contribui para que a Terra tenha uma temperatura que permite a existência de água líquida à superfície. Caso contrário, a Terra seria cerca de 33°C mais fria do que a

média pré-industrial. A existência do efeito de estufa é conhecida, pelo menos, desde que foi proposta pelo físico e matemático francês Joseph Fourier, em 1824.

Com a Revolução Industrial, as sociedades humanas começaram a queimar grandes quantidades de combustíveis fósseis que se encontram armazenados nos depósitos minerais. Começando com o carvão no século XVIII e XIX, o petróleo generalizou-se a partir do início do século XX e o gás natural na segunda metade desse século. Além das implicações geopolíticas que a centralidade destes combustíveis trouxe, a sua utilização em quantidades cada vez maiores levou à libertação para a atmosfera de grandes quantidades de gases de efeito de estufa, principalmente, de  $\text{CO}_2$ . Em 2013, a concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera ultrapassou pela primeira vez desde que há registos as 400 partes por milhão (ppm) em volume, que compara com 270 ppm em média no período pré-industrial. Atualmente a concentração de  $\text{CO}_2$  é de 410 ppm em volume. De acordo com os dados que é possível obter dos furos de gelo e de outras formas de medição indireta, a concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera da Terra é agora muito mais elevada do que em qualquer outro momento nos últimos 800 000 anos (FIGURA 1). Os dados dos núcleos de gelo também permitem confirmar com grande rigor a forma como a temperatura média global acompanha a concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera terrestre, sendo este o principal gás de efeito de estufa a seguir ao vapor de água (que tem um efeito de *feedback*).

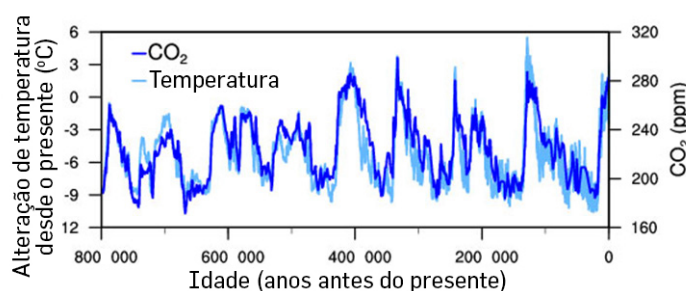


FIGURA 1. Variação da temperatura (azul claro) e da concentração de dióxido de carbono (azul escuro) medidos a partir do furo de gelo "EPICA Dome C", na Antártida<sup>1</sup>.

Sendo o mais importante, o efeito de estufa não é o único mecanismo através do qual os humanos estão a alterar o clima do planeta. A intensificação da utilização do solo, com a desflorestação massiva, ou a libertação de partículas e aerossóis são outros fatores que provocam alterações climáticas e se combinam para que, em pouco mais de um século, se tenha aquecido o planeta em média em  $1^\circ\text{C}$  (FIGURA 2).

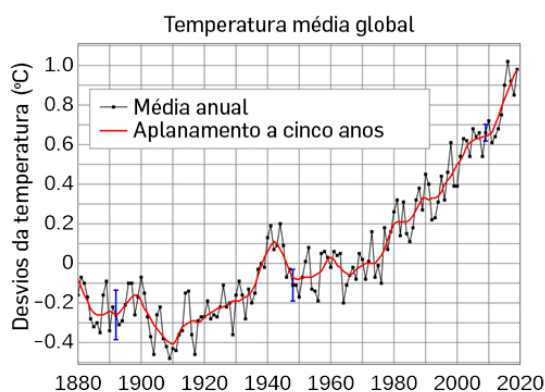


FIGURA 2. Evolução da temperatura média global entre 1880 e 2020, com média móvel de 5 anos (linha vermelha)<sup>2</sup>.

## O Sistema Terrestre: um Sistema Dinâmico Complexo

O aumento da concentração de gases de efeito de estufa na atmosfera desencadeia, também, um conjunto de reações à escala global que provocam alterações em todos os sistemas físicos, químicos e biológicos do planeta.

Um exemplo importante é o efeito que o aumento de concentração de  $\text{CO}_2$  tem nos oceanos. A concentração de  $\text{CO}_2$  na água do mar encontra-se em equilíbrio com a da atmosfera. Se a concentração atmosférica deste gás aumentar, uma percentagem significativa desse aumento é absorvida pelos oceanos. Por sua vez, isto altera os equilíbrios químicos da própria água do mar e torna-a mais ácida. A acidificação dos oceanos, se por um lado amortece o aumento dos gases de efeito de estufa na atmosfera, tem consequências muito negativas para a vida que os mares suportam. A este efeito acresce o aumento de temperatura da própria água do mar.

O aumento da temperatura também interfere nos ciclos das chuvas, provoca a fusão das calotes polares, modificando ecossistemas e reduzindo a refletividade da Terra (albedo), altera as correntes marinhas e a estratificação da coluna de água no mar, derrete os solos congelados (*permafrost*), aumenta o nível de humidade no ar, reduz a humidade do solo, modifica balanços energéticos e ciclos bioquímicos, intensifica fenómenos meteorológicos extremos e introduz várias outras modificações que interagem entre si, amplificando alguns dos efeitos e desencadeando novas causas. Todas estas mudanças no ambiente físico introduzem desequilíbrios progressivos na biologia e na relação entre as espécies de seres vivos, podendo, por exemplo, expor as populações a agentes patogénicos com os quais não teriam contacto de outra forma.

Acresce ainda que muitos dos mecanismos conhecidos têm ciclos de retroação (*feedback loops*). Por exemplo, a fusão dos solos congelados na Sibéria e noutras regiões circumpolares poderá provocar a libertação de grandes quantidades de metano ( $\text{CH}_4$ ) que se encontra retido no gelo. O metano é um gás de efeito de estufa bastante mais eficaz do que o  $\text{CO}_2$ . Atualmente a concentração de metano é cerca de duzentas vezes menor que a concentração de  $\text{CO}_2$ .

A grande maioria dos seres vivos não será capaz de evoluir modificando a sua biologia a tempo de acompanhar a mudança dos sistemas físicos onde vive, dando origem a uma extinção em massa que, tudo indica, já está em curso.

Mantendo-se o ritmo das mudanças observadas, estas aprofundar-se-ão significativamente e provocarão grandes disrupções no funcionamento das sociedades humanas. Muitas cidades costeiras serão inundadas, regiões húmidas e com neve abundante poderão tornar-se mais quentes e secas, os leitos de alguns rios e lagos poderão secar; as secas aumentarão prejudicando as colheitas, as reservas de água potável para consumo, higiene, agricultura e produção de alimentos poderão diminuir; poderá ocorrer a extinção de muitas espécies animais e vegetais; certos fenómenos climáticos extremos, como furacões, tornados e outras tempestades, determinados por alterações de temperatura e no mecanismo de evaporação da água, poderão tornar-se mais frequentes.

Pode-se facilmente imaginar a repercussão catastrófica de um cenário desta natureza e com tais consequências sobre a espécie humana e as sociedades. A nível social, a repercussão já é visível na economia, na política, na saúde, no abastecimento e na segurança social, entre outras áreas. Não é provável que qualquer área da sociedade ou qualquer região do planeta venha a ser poupada a significativas dificuldades, se as tendências per-

manecerem inalteradas, muito embora a distribuição dos impactos possa ser muito assimétrica, sendo expectável um maior impacto em geografias mais vulneráveis, acentuando, e criando novas desigualdades sociais.

## A Emergência do Antropocénico

Por todas as razões enunciadas, faz sentido enquadrar o estudo das alterações climáticas numa abordagem que considere como objeto de análise o Sistema Terrestre, o sistema resultante da integração e das relações recíprocas associadas à Atmosfera, à Biosfera, à Criosfera, à Hidrosfera, à Litosfera Superior. Neste contexto, é possível verificar que as alterações causadas pelo homem relativamente às condições de referência dos últimos 11700 anos, a época geológica conhecida como o Holocénico, sugerem uma nova época geológica emergente: o Antropocénico<sup>3,4,5</sup>.

A abordagem sistémica do Sistema Terrestre sugere que o estudo do impacto das atividades humanas sobre o planeta se faça através de um conjunto de variáveis de estado, as chamadas Fronteiras Planetárias (*Planetary Boundaries*, FIGURA 3)<sup>6</sup>.

Foram identificadas, pelo menos, dez variáveis relevantes: alterações climáticas; perda de biodiversidade e extinção de espécies; destruição do ozono estratosférico; acidificação dos oceanos; fluxos bio-geoquímicos associados aos ciclos do fósforo e do azoto; destruição de ecossistemas primordiais; utilização da água doce; carga atmosférica de aerossóis; poluição química, radioativa, de nano-materiais e micro-plásticos. Nesta base, podem então ser definidos limites acima dos quais resultam perturbações graves ao funcionamento do Sistema Terrestre. A observação, em 2015<sup>5</sup>, de que quatro das Fronteiras Planetárias (alterações climáticas, perda de biodiversidade e extinção de espécies, fluxos bio-geoquímicos associados aos ciclos do fósforo e do azoto e alterações nos solos) já foram ultrapassadas sugere que medidas de mitigação devem ser urgentemente desenhadas e implementadas.

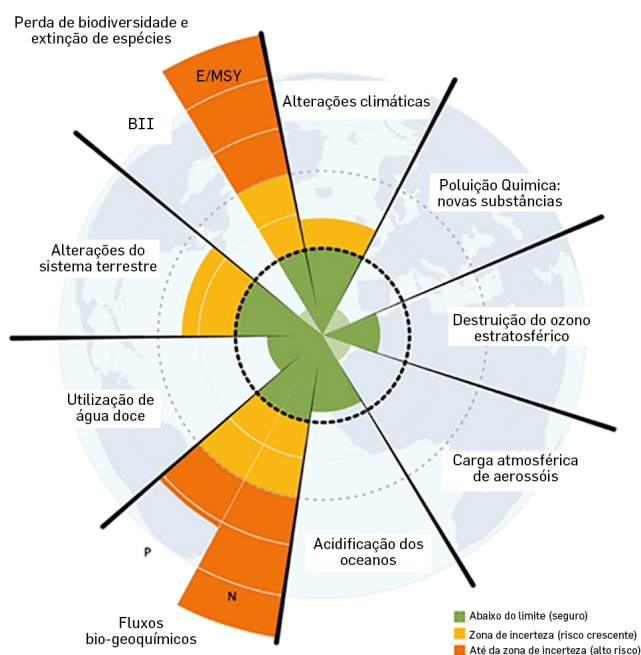


FIGURA 3. Fronteiras Planetárias: a verde a zona de segurança, a amarelo e laranja aquelas em que já foi ultrapassado esse limite.

Por outro lado, a importância destas transformações e das suas implicações em todas as esferas da atividade humana, impulsionou a emergência de uma nova ciência, a Ciência do Sistema Terrestre<sup>7</sup>, e o surgimento de modelos físicos<sup>8,9,10</sup> para o descrever, que permitam desenhar estratégias para sua gestão e regulação<sup>11</sup>, e onde se constata a necessidade de construir comunidades resilientes<sup>12,13</sup>.

Os modelos do Sistema Terrestre sugerem que a ação humana pode deslocar irreversivelmente o ponto de equilíbrio desse sistema para uma região de onde será muito difícil retroceder (FIGURA 4).

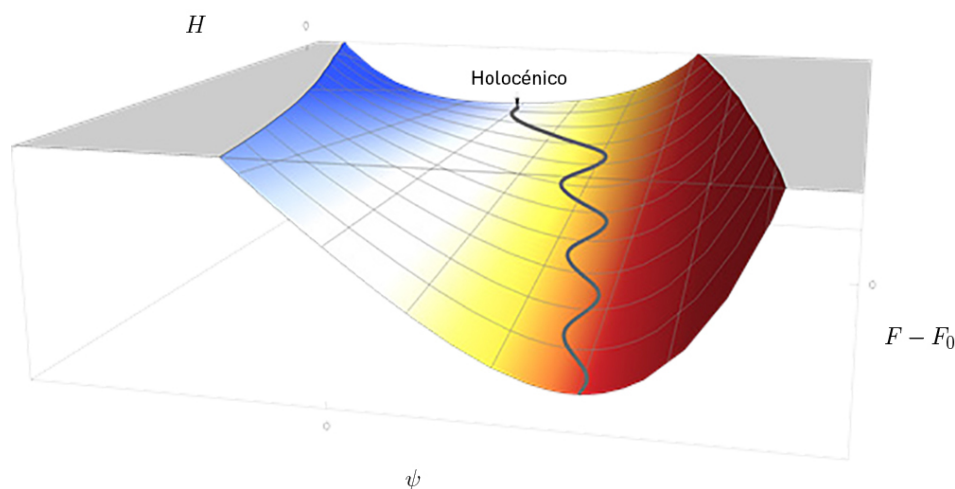


FIGURA 4. Diagrama de estabilidade do Sistema Terrestre e a sua trajetória das condições estáveis do Holocénico para um novo equilíbrio onde a temperatura média é necessariamente mais elevada. Neste diagrama,  $F$ , representa a energia livre,  $H$ , a atividade humana,  $\psi$ , a diferença de temperatura com relação a temperatura média no Holocénico<sup>7,14</sup>.

As questões associadas às alterações climáticas têm um impacto tão vasto sobre o funcionamento das sociedades humanas e a forma como nos relacionamos com outros seres vivos, que a participação de outras vertentes do conhecimento, muito particularmente, a filosofia e as ciências sociais, se torna indispensável<sup>15,16</sup>.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup> NOAA, [Temperature Change and Carbon Dioxide Change](#).
- <sup>2</sup> NASA & GISS, [Surface Temperature Analysis](#).
- <sup>3</sup> CRUTZEN, P. J. & STOERMER, E. F., *The Anthropocene*, Global Change Newsletter, 41, 17-18. 2000.
- <sup>4</sup> STEFFEN, W. et al., [The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?](#), *Ambio*, 36, (8), 614-621. 2007.
- <sup>5</sup> STEFFEN, W. et al., [The emergence and evolution of Earth System Science](#), *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 54-63. 2020.
- <sup>6</sup> ROCKSTRÖM, J. et al., [Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity](#), *Ecology and Society*, 14, 2: 32. 2009.
- <sup>7</sup> STEFFEN, W., et al., [Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet](#), *Science*, 347: 736. 2015.
- <sup>8</sup> BERTOLAMI, O. & FRANCISCO, F., [A physical framework for the Earth system, Anthropocene equation and the great acceleration](#), *Global Planet. Change*, 169, 66-69. 2018.
- <sup>9</sup> BERTOLAMI, O. & FRANCISCO, F., [A phase space description of the Earth system in the Anthropocene](#), *EPL (Europhysics Letters)*, 127, 5, 59001. 2019.
- <sup>10</sup> BARBOSA, M. et al., [Towards a physically motivated planetary accounting framework](#), *The Anthropocene Review*, DOI: 10.1177/2053019620909659. 2020.
- <sup>11</sup> BERTOLAMI, O. & FRANCISCO, F., [A Digital Contract for the Earth System Restoration Mediated by a Planetary Boundary Exchange Unit](#). 2020.
- <sup>12</sup> GONÇALVES, C. & BERTOLAMI, O., [Pandemias, riscos, crises: a importância de investir em comunidades resilientes](#), *Pública*, 8 junho. 2020.
- <sup>13</sup> GONÇALVES, C. & BERTOLAMI, O., [Anthropic risks, Coronavirus pandemic \(COVID-19\), climate change \(& other disas-](#)

*ters): An attempt to reach public perception.* 2020.

<sup>14</sup> STOCKHOLM RESILIENCE CENTRE, [Planetary boundaries research](#).

<sup>15</sup> MALDONADO, M., [Antropocénico. La política en la era humana](#), Penguin Random House, Madrid. 2018.

<sup>16</sup> MENDES, J. & SYLLA, B., [EIBEA 2019. Encontro Iberoamericano de Estudos do Antropocénico](#), Livro de Atas.