



# Um guia ilustrado sobre a crise climática





# Sobre Eunice

O Espaço Unificado de Informação Climática e Engajamento (Eunice) é uma iniciativa do Observatório do Clima criada para ajudar o público a entender a ciência do clima.

Nesta versão impressa, você vai descobrir como e por que o planeta está esquentando, a origem dos eventos extremos, as soluções possíveis e as ações da sociedade para enfrentar as mudanças climáticas.

O nome da iniciativa também homenageia Eunice Foote (1819-1888), cientista americana que foi uma das descobridoras do efeito estufa, mas cuja contribuição foi apagada por mais de um século pelo fato de ser mulher.

Para conhecer a versão on-line, acesse: [eunice.oc.eco.br](http://eunice.oc.eco.br)

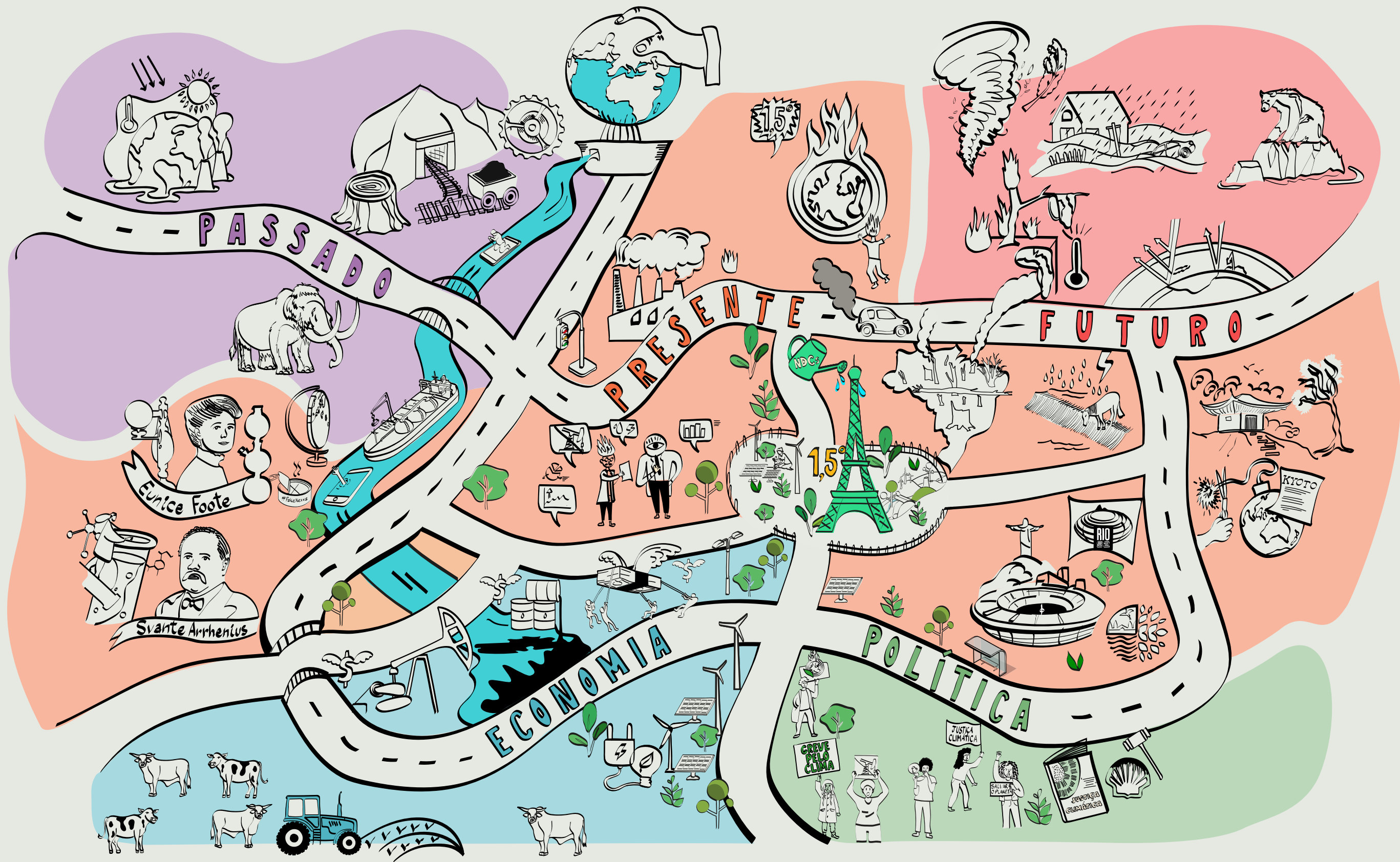
## Sobre o Observatório do Clima

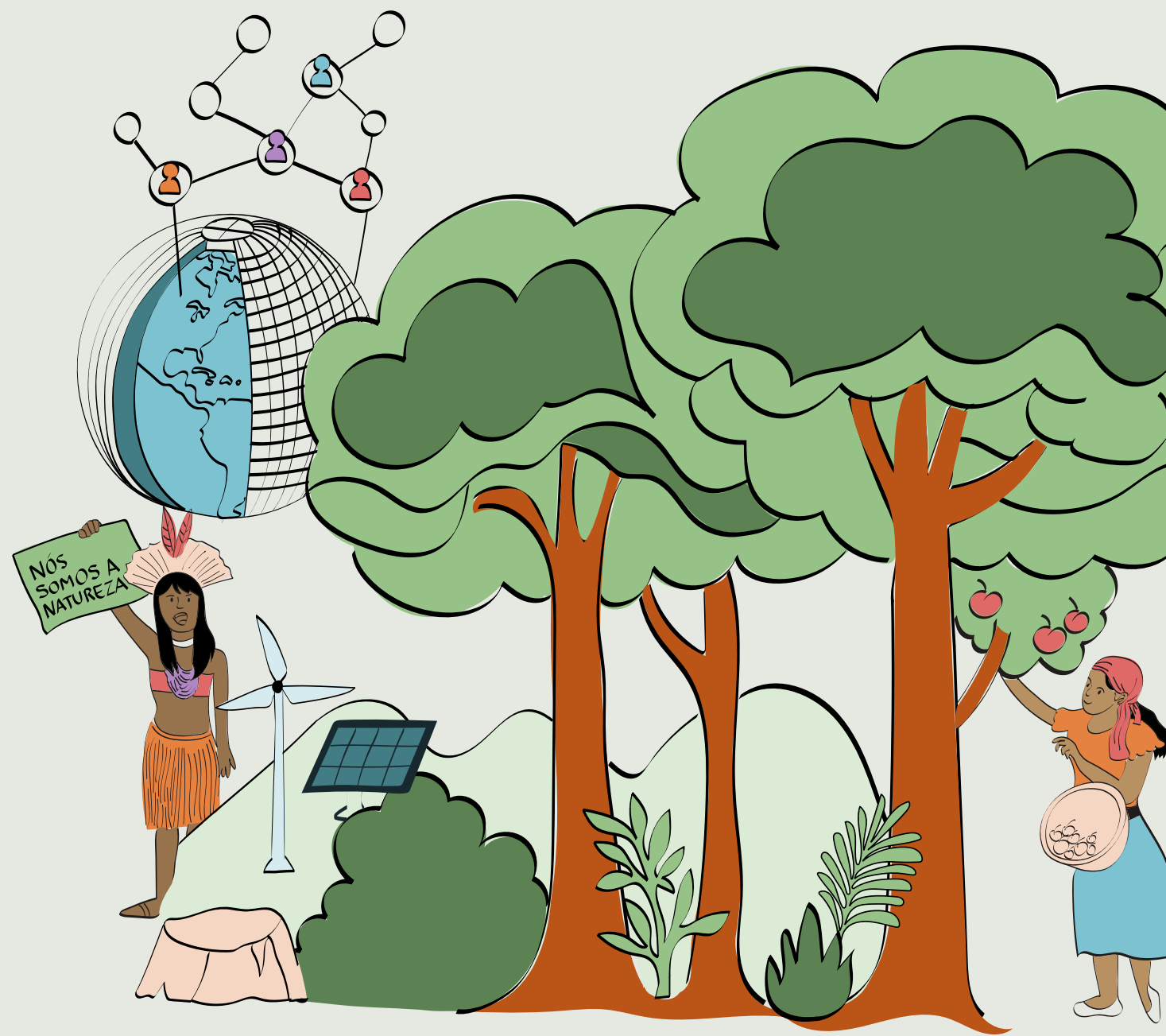
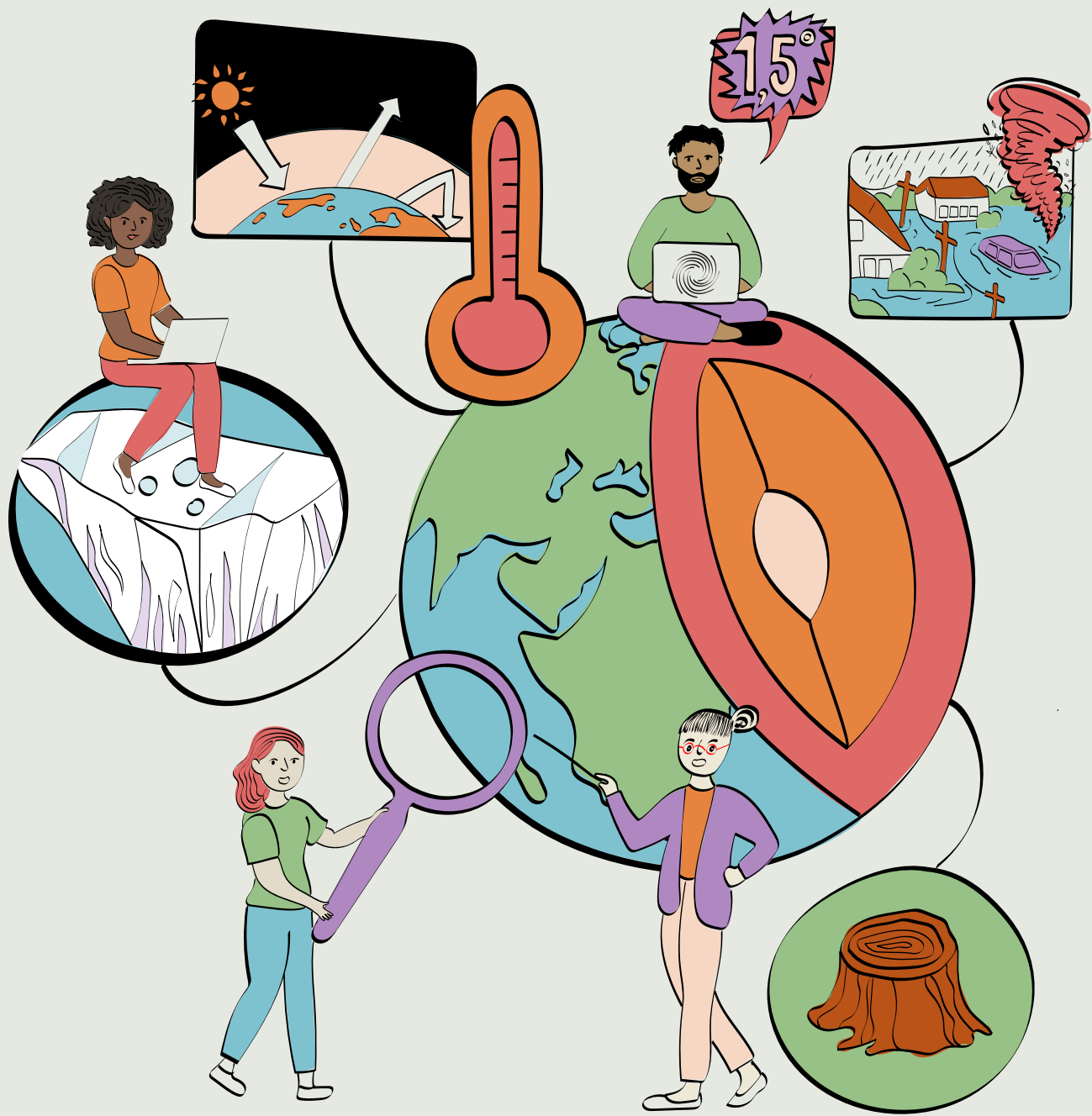
O Observatório do Clima (OC) é uma rede da sociedade civil brasileira sobre a agenda climática, com 133 integrantes, entre organizações socioambientais, institutos de pesquisa e movimentos sociais. Fundado em 2002, tem como objetivo ajudar a construir um Brasil descarbonizado, igualitário, próspero e sustentável, na luta contra a crise climática.

Conheça o OC: [oc.eco.br](http://oc.eco.br)



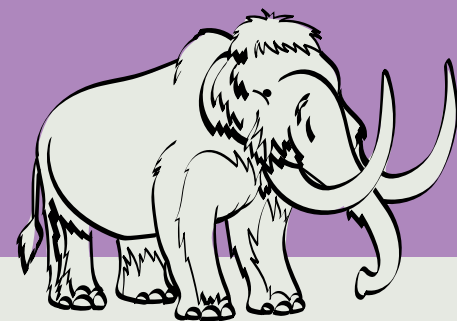
OBSERVATÓRIO  
DO **CLIMA**







# Passado



|     |                                               |    |
|-----|-----------------------------------------------|----|
| 01  | <b>O efeito estufa</b>                        |    |
| 01a | A diferença entre o remédio e veneno é a dose | 11 |
| 02  | <b>As mudanças climáticas naturais</b>        |    |
| 02a | A gangorra climática do passado               | 22 |
| 02b | Os ciclos da Milankovich                      | 28 |
| 02c | A era da estabilidade: o Holoceno             | 33 |
| 02d | Como desvendar o clima antigo                 | 34 |

# Presente



|     |                                                   |     |
|-----|---------------------------------------------------|-----|
| 03  | <b>O aquecimento global</b>                       |     |
| 03a | A descoberta da crise (e dos culpados)            | 42  |
| 03b | A Revolução Industrial                            | 58  |
| 03c | As causas do aquecimento global                   | 61  |
| 03d | Tem culpa eu? (Spoiler: tem)                      | 66  |
| 04  | <b>O IPCC</b>                                     |     |
| 04a | A ciência ataca a crise do clima                  | 70  |
| 05  | <b>O negacionismo</b>                             |     |
| 05a | A Indústria fóssil aposta pesado na desinformação | 76  |
| 06  | <b>A convenção do clima</b>                       |     |
| 06a | Uma resposta global para um problema global       | 84  |
| 06b | Pioneirismo em Kyoto                              | 86  |
| 06c | Copenhague: crônica de um fracasso                | 88  |
| 07  | <b>O Acordo de Paris</b>                          |     |
| 07a | A última chance da humanidade                     | 91  |
| 08  | <b>O Brasil</b>                                   |     |
| 08a | O status do país                                  | 96  |
| 08b | A crise hoje                                      | 104 |
| 08c | As pautas sociopolíticas                          | 109 |

# Política

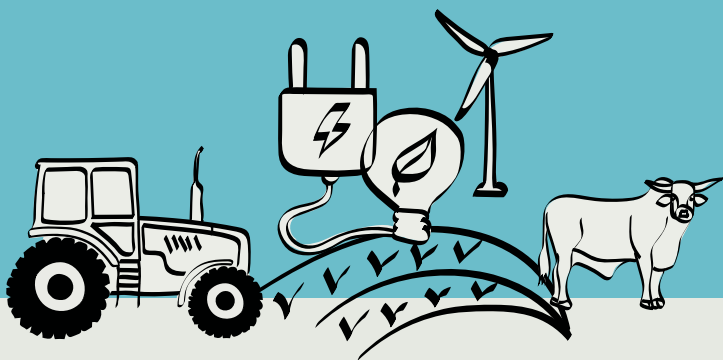


09

## A sociedade civil

|     |                                                                    |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 09a | O papel das organizações e da população na luta climática          | 116 |
| 09b | Ações judiciais sobre clima                                        | 122 |
| 09c | Justiça climática para enfrentar os impactos das mudanças do clima | 125 |

# Economia



10

## A energia

|     |                                           |     |
|-----|-------------------------------------------|-----|
| 10a | Como o sistema energético impacta o clima | 132 |
| 10b | Carvão: o primeiro a ser eliminado?       | 136 |
| 10c | A ascensão e o poder do petróleo          | 138 |
| 10d | Gás: o combustível da transição?          | 141 |
| 10e | A expansão das energias renováveis        | 142 |
| 10f | A controvérsia do uso de usinas nucleares | 150 |

11

## A agropecuária

|     |                                                          |     |
|-----|----------------------------------------------------------|-----|
| 11a | O boi e a monocultura como vetores de poluição climática | 152 |
|-----|----------------------------------------------------------|-----|

# Futuro



|     |                                                                          |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12  | <b>O clima que não queremos</b>                                          |     |
| 12a | Entenda os efeitos do aquecimento 1,5° e além                            | 164 |
| 12b | O mundo é uma chaleira                                                   | 165 |
| 12c | Corrida de furação                                                       | 166 |
| 12d | Peste, fome, guerra, morte: os quatro cavaleiros do apocalipse climático | 169 |
| 13  | <b>O pior cenário</b>                                                    |     |
| 13a | Os pontos de virada do clima                                             | 180 |
| 14  | <b>A geoengenharia</b>                                                   |     |
| 14a | O risco da demora e de criar mais problemas                              |     |
| 14b | Remoção de dióxido de carbono (CDR)                                      | 188 |
| 14c | Geoengenharia Solar                                                      | 189 |
|     |                                                                          | 193 |

# O efeito estufa



01a

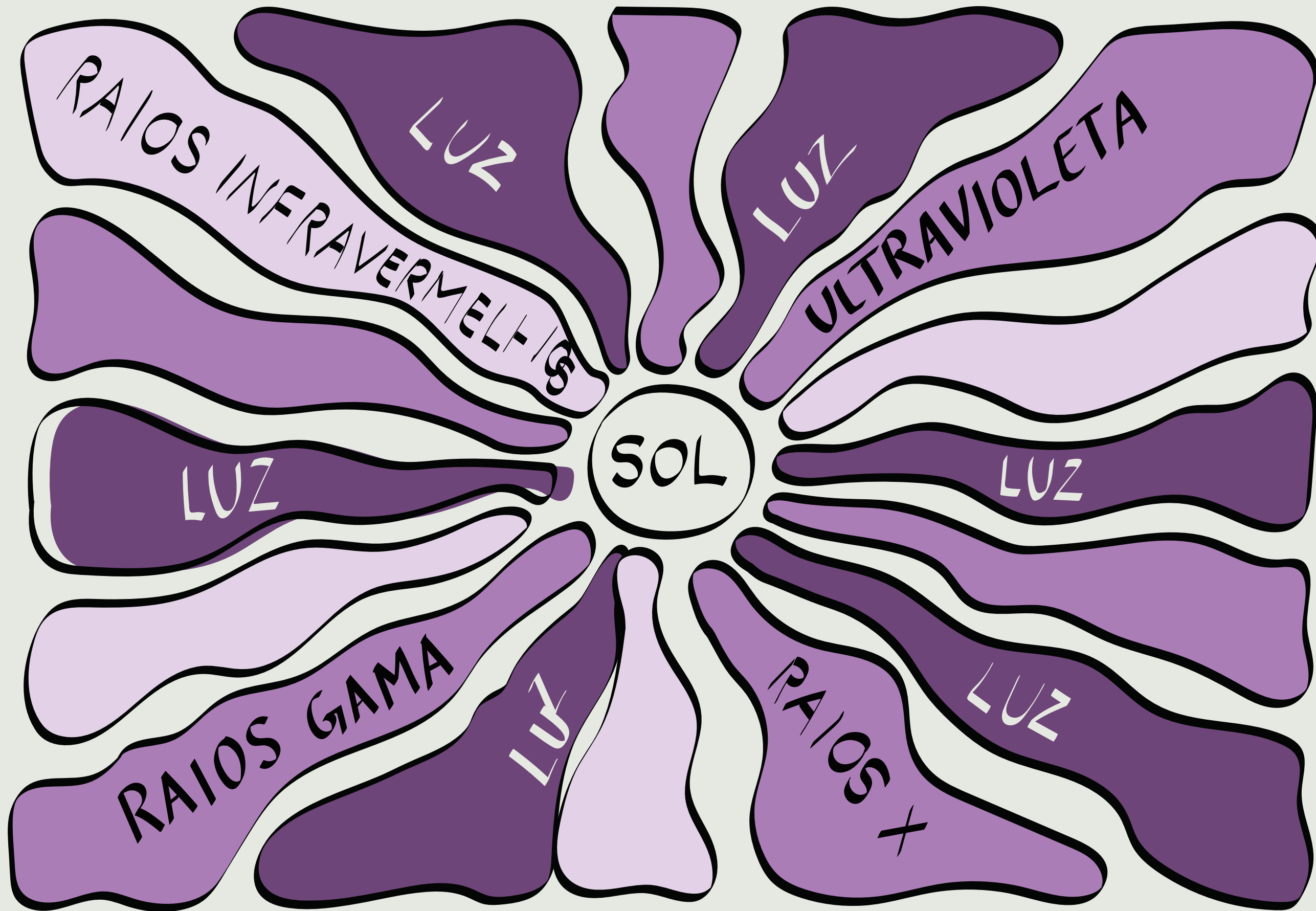
## A diferença entre remédio e veneno é a dose

Você já parou para pensar no que faz com que a Terra seja habitável? O grande responsável por isso é o efeito estufa, um processo natural por meio do qual alguns gases presentes na atmosfera retêm parte do calor do Sol. Sem esse fenômeno, o planeta seria uma bola de gelo a  $-19^{\circ}\text{C}$ , inviável para formas de vida complexas, cujo desenvolvimento depende de água líquida. O problema é que a diferença entre remédio e veneno é a dose: as ações humanas nos últimos duzentos anos têm intensificado o efeito estufa, aumentando descontroladamente a temperatura e causando as mudanças climáticas.

Para entender o efeito estufa e seu gêmeo maligno, o aquecimento global, é preciso viajar 149 milhões de quilômetros pelo espaço até o lugar que comanda a máquina do clima da Terra: o Sol. A estrela envia energia para nosso planeta na forma de radiação eletromagnética (luz) de vários tipos. A maior parte é luz visível, mas também recebemos radiação ultravioleta, raios X, raios gama e infravermelho. Cada metro quadrado da Terra recebe, a cada segundo, 342 Watts de radiação solar (para comparação, o Sol produz 386 quatrilhões de megawatts de energia por segundo). Parte dessa radiação emitida pelo Sol volta para o espaço, rebatida por nuvens e por aerossóis na alta atmosfera. Parte é refletida por







superfícies claras do planeta, como gelo, neve e desertos, que têm alto poder de reflexão (conhecido como “albedo”). E uma parte dessa radiação — cerca de 240 W/m<sup>2</sup> — é absorvida pela superfície terrestre e pela atmosfera, pondo em marcha ventos e correntes marinhas e permitindo a fotossíntese.

Como ocorre o efeito estufa

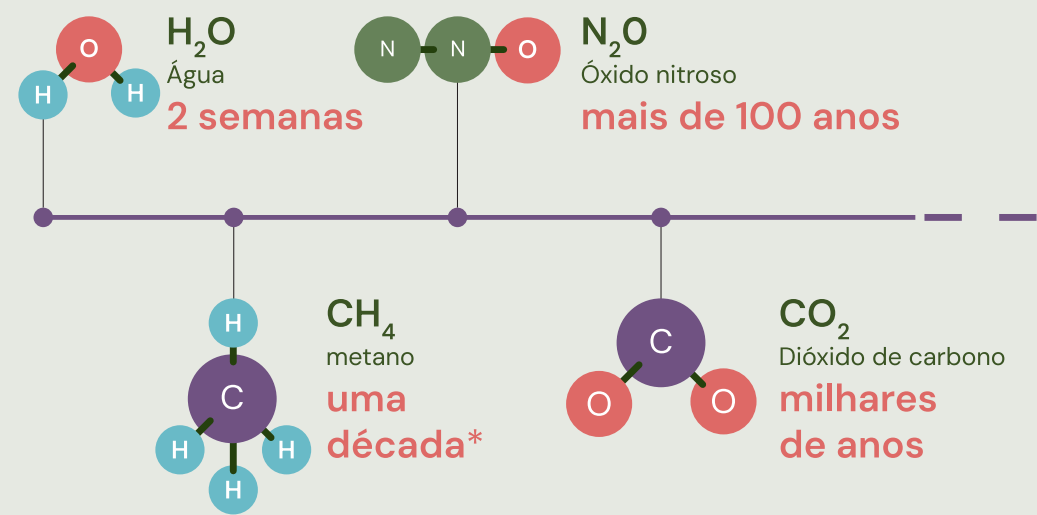


Fonte: IPCC

A radiação solar absorvida pela superfície terrestre é reemitida na forma de raios infravermelhos, ou calor. Tudo na Terra — plantas, animais, objetos — emite essa radiação de grande comprimento de onda. Os 240 W/m<sup>2</sup> absorvidos deveriam voltar ao espaço na forma de infravermelho. Se isso acontecesse, a temperatura na superfície terrestre seria de 19°C negativos. Em vez disso, a média na Terra é de 15 °C positivos. Por quê?

Ocorre que o calor reemitido é impedido de retornar imediatamente. Ele é retido na atmosfera por uma espécie de cobertor de gases, que existem em pequena proporção no ar, mas são extremamente eficientes em absorver luz na frequência do infravermelho. Os principais desses gases são o vapor d’ água, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Essas moléculas, chamadas gases de efeito estufa, absorvem a energia térmica e a reemitem em várias direções, aumentando a temperatura do planeta. O vapor d’água é o gás de efeito estufa mais abundante, mas sua presença na atmosfera é regulada pelos outros gases, principalmente o CO<sub>2</sub> (é preciso haver evaporação para que haja vapor d’água no ar).

Duração média dos gases de efeito estufa na atmosfera



\*Em média, mas absorve mais energia do que o CO<sub>2</sub>  
Fonte: Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos



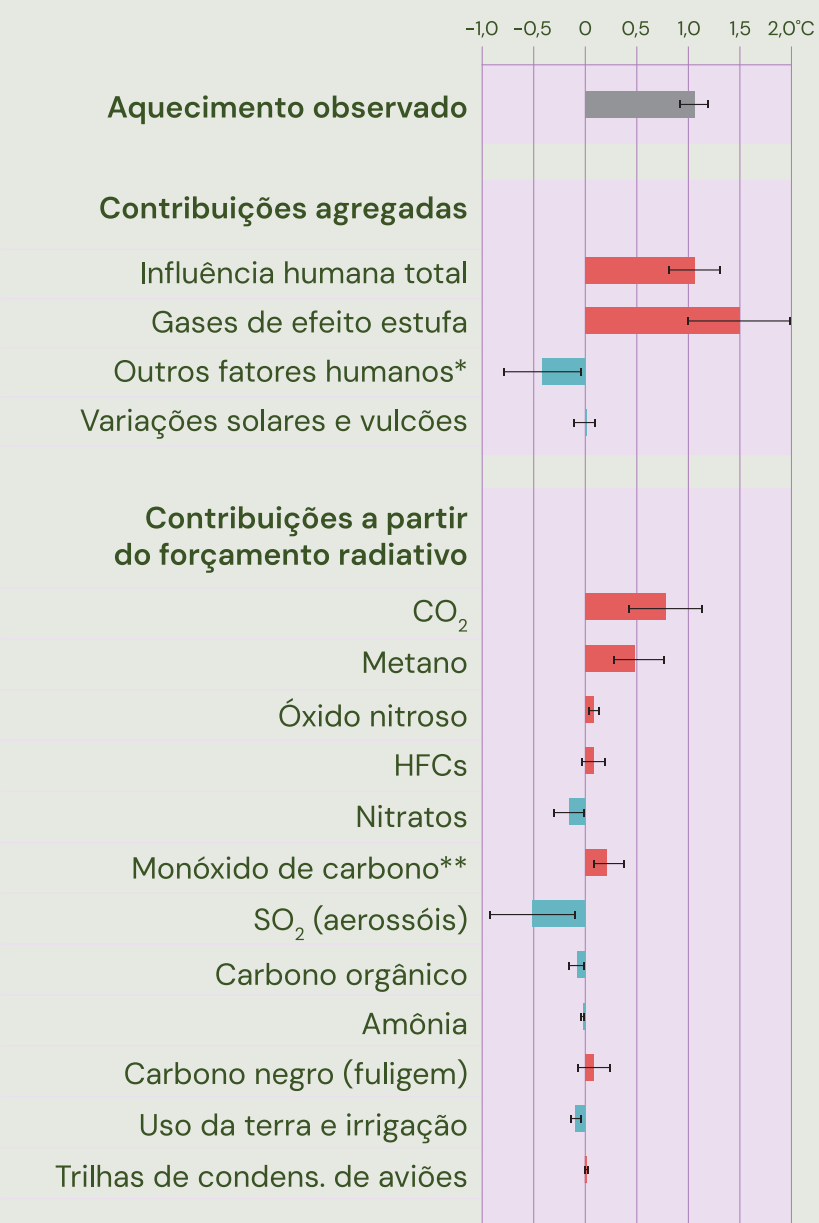
A medida do desequilíbrio entre a energia que chega à Terra a cada segundo e a que sai é chamada de forçante radiativa. Há fatores de forçamento radiativo positivo, como gases de efeito estufa e variações na irradiação solar, e negativo, como a camada de ozônio na estratosfera e aerossóis emitidos por poluição humana ou por erupções vulcânicas. Quando essas forças estão desequilibradas, a temperatura média do nosso planeta se torna mais quente ou mais fria.

Vulcões podem lançar dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) na estratosfera, onde esse gás se converte em ácido sulfúrico que, ao se condensar rapidamente, forma aerossóis finos de sulfato. Estes componentes rebatem a radiação solar, ajudando a resfriar o planeta. O efeito pode durar mais de um ano, como no caso da erupção do monte Pinatubo, nas Filipinas, em 1991, que resfriou o planeta em 0,2°C a 0,5°C por mais de dois anos.

A ciência vem medindo todos os fatores de forçamento radiativo da Terra e concluiu que, nas últimas décadas, os gases-estufa emitidos por atividades humanas desde o início da Revolução Industrial são os principais fatores de desequilíbrio, levando o planeta a esquentar muito e rapidamente. A quantidade de dióxido de carbono é intensificada principalmente pela queima de combustíveis fósseis e pelo desmatamento, enquanto o metano e o óxido nitroso têm como principais fontes a agropecuária. Segundo o IPCC, em 2019 os humanos haviam aumentado em 2,72 Watts por metro quadrado a energia retida no planeta em comparação com o período anterior à Revolução Industrial. É como se tivéssemos ligado oito lâmpadas de árvore de Natal em cada metro quadrado da superfície do planeta.

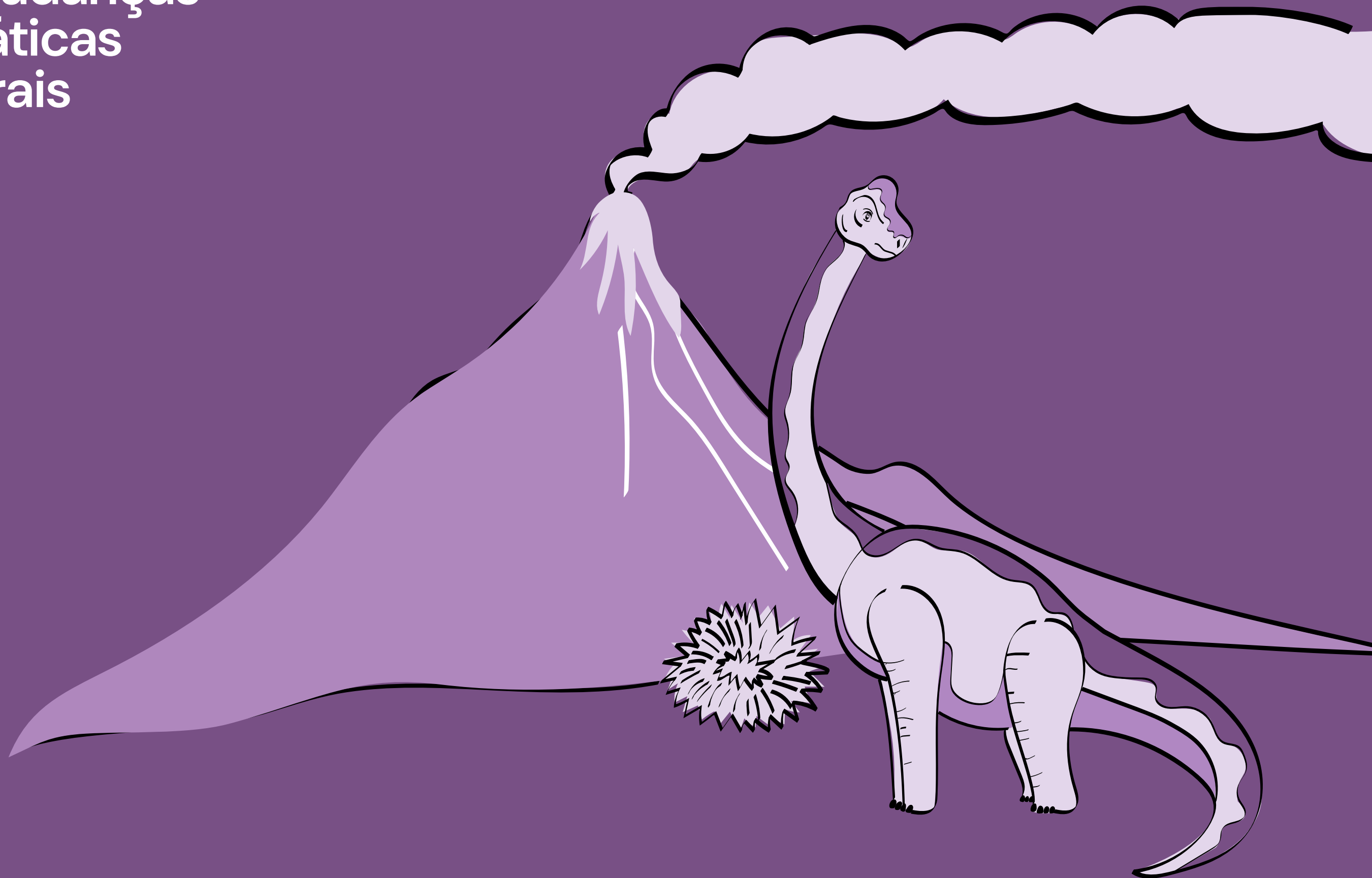
Além disso, mudanças no albedo da Terra — causadas pela redução de áreas cobertas por gelo e neve —, também têm contribuído para intensificar o desequilíbrio energético. Em resumo, estamos prendendo muito calor na atmosfera ao descontrolar o efeito estufa. É por isso que estamos enfrentando uma crise climática.

### Aquecimento entre 2010 e 2019 e os fatores responsáveis



\* Poluição por enxofre etc.  
\*\* Inclui compostos orgânicos voláteis  
Observação: Aumento da temperatura analisado em comparação a 1850-1900  
Fonte: Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC

# As mudanças climáticas naturais





## A gangorra climática do passado

O planeta Terra tem aproximadamente 4,6 bilhões de anos e já passou por várias mudanças climáticas naturais nesse período, o que não significa que a atual também seja natural. Elas moldaram o planeta e contribuíram para extinções em massa. Para entender melhor sobre o que aconteceu no passado, voltaremos alguns milhões de anos na história e veremos o que influenciou momentos de extremo aquecimento e resfriamento.

Durante o pré-Cambriano, a superfície da Terra ficou coberta de gelo entre 800 e 600 milhões de anos atrás. No entanto, os vulcões estavam ativos, emitindo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), e as chuvas eram escassas. Com o tempo seco e a intensa atividade vulcânica, o planeta foi se transformando em uma estufa devido ao excesso de  $\text{CO}_2$ . Há cerca de 445 milhões de anos, a Terra voltou a congelar, o que fez com que espécies marinhas primitivas de águas rasas fossem extintas. Esta foi a primeira extinção em massa provocada por uma mudança climática — ocorreram outras quatro extinções em massa, mas com influência das altas temperaturas.

Milhares de anos depois, o planeta aqueceu novamente em diferentes períodos. Um exemplo foi há cerca de 90 milhões de anos, no Período Cretáceo. Não havia

gelo permanente em lugar algum do mundo e dinossauros vagavam por florestas luxuriantes onde hoje é a Antártida. Cientistas apontam que a intensa atividade vulcânica aumentou novamente as concentrações de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, que eram até três vezes mais altas do que hoje em dia.

Cerca de 56 milhões de anos atrás, ocorreu o Máximo Térmico do Paleoceno-Eoceno (PETM, na sigla em inglês), quando a temperatura média global pode ter aumentado entre 5 °C e 8 °C. Para comparar, no Acordo de Paris, foi proposto que o aumento da temperatura atual fosse limitado a 1,5°C.

Análises paleoclimáticas, que consideram elementos como fitoplâncton fossilizado e sedimentos oceânicos, indicam que, mais ou menos na mesma época, houve outra grande liberação de  $\text{CO}_2$ . Esse gás pode ter sido liberado pela secagem de grandes mares, atividade vulcânica, descongelamento do permafrost – solo permanentemente congelado – e grandes incêndios florestais. Há também evidências de emissões de metano.

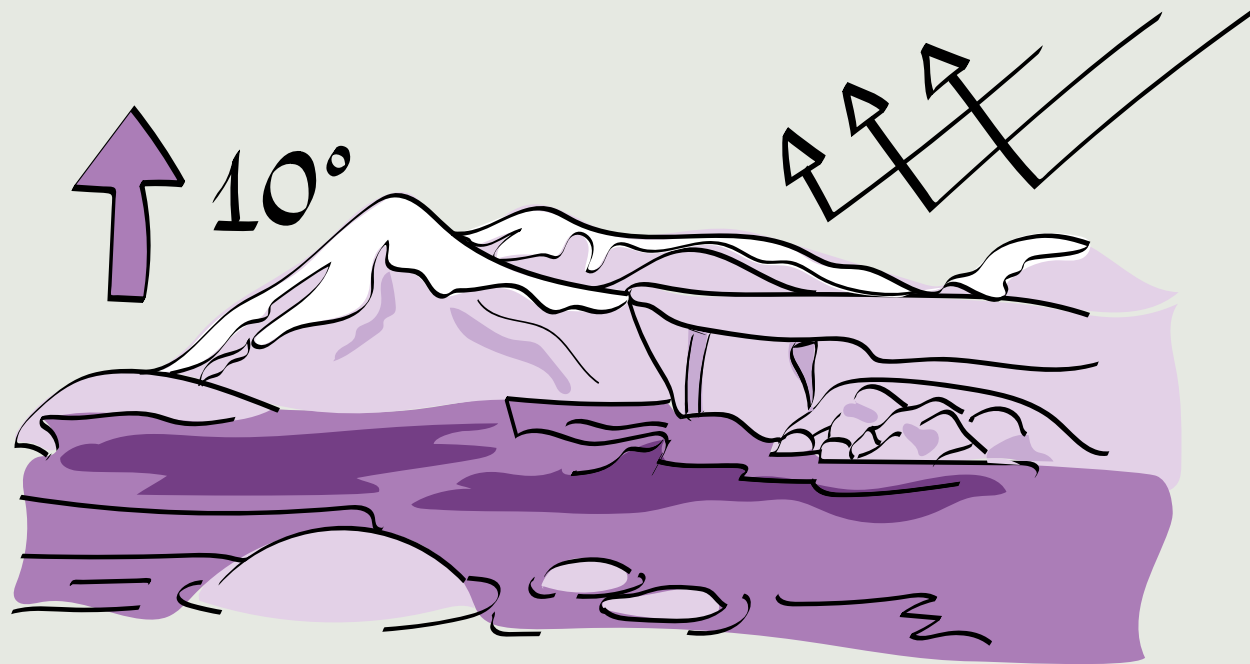
Em resumo, os vulcões desempenhavam um papel central nas mudanças climáticas. O excesso de  $\text{CO}_2$  liberado pelas erupções não apenas intensificava o efeito estufa, mas também acidificava os oceanos, impactando severamente os ecossistemas.





Durante o Plioceno, entre 3,15 e 2,84 milhões de anos atrás, quando os ancestrais dos humanos começaram a descer das árvores, houve outro período quente. É possível que esse aquecimento tenha sido influenciado pelo aumento dos níveis de gases de efeito estufa e pelo transporte de calor oceânico.

Experimentos da Nasa indicam que, ao longo das costas do Ártico, houve um aumento de temperatura de até 10°C, sendo o maior aquecimento registrado durante o inverno. Nesse contexto, grande parte do calor foi influenciada pelo “feedback de albedo”, que é a mudança no padrão de absorção e reflexão da energia solar. A cor branca da neve e do gelo reflete parte da radiação solar de volta para o espaço. Com a redução da cobertura de neve devido ao aquecimento, menos energia solar foi refletida, especialmente durante o inverno.



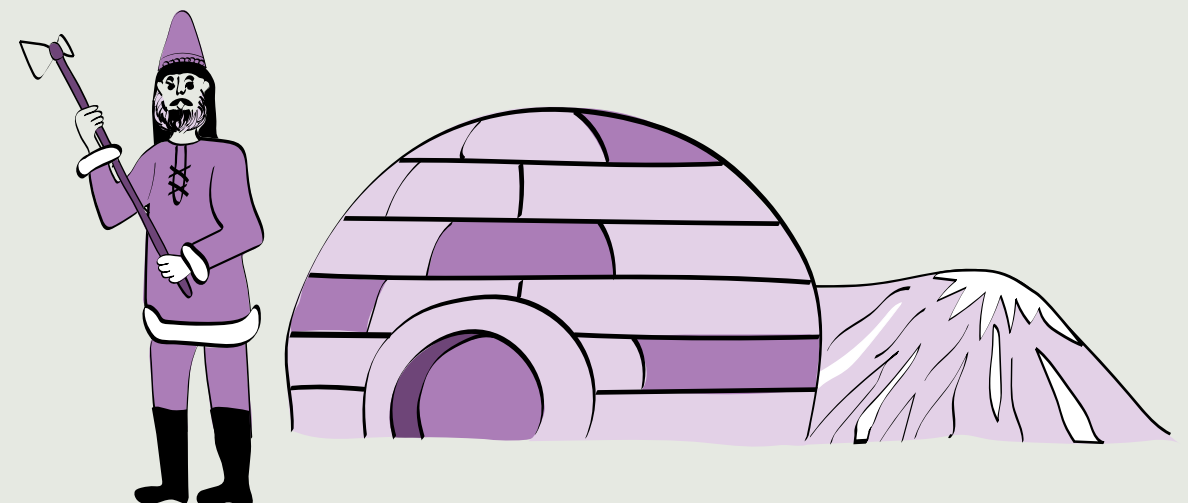
No Holoceno, época geológica iniciada há cerca de 11.700 anos, houve momentos de aquecimento conhecidos como Período Quente Medieval ou Anomalia Climática Medieval, registrado no hemisfério Norte entre os anos 950 e 1250.

Há indícios de que o Período Quente Medieval foi causado por um aumento na radiação solar. Além disso, acredita-se que os padrões de circulação oceânica tenham mudado, levando águas mais quentes para o Atlântico Norte. O aquecimento atingiu diferentes regiões, mas não foi universal nem ocorreu simultaneamente em todos os lugares.

As consequências também variaram. Em regiões como o norte da Europa, partes da América do Norte, Ásia central, norte da Rússia, nordeste da China e norte do Japão, o aumento das temperaturas favoreceu a expansão agrícola. Por outro lado, em algumas áreas das Américas, populações enfrentaram secas extremas.

Oscilações climáticas curtas também ocorreram no sentido oposto. Um exemplo é a Pequena Idade do Gelo, que começou por volta do século 14 e terminou em meados do século 19, na Europa, com temperaturas médias 40% mais baixas no hemisfério Norte. Nesse período, o Sol entrou numa baixa de atividade conhecida como Mínimo de Maunder, na qual as manchas solares (relacionadas a pequenas variações na radiação enviada pela estrela) praticamente sumiram.

Alguns cientistas associam essa fase solar à queda das temperaturas boreais. É nesse intervalo que os vikings abandonam sua colônia na Groenlândia, e também datam dessa época pinturas europeias que mostram invernos muito rigorosos em Londres e Paris.

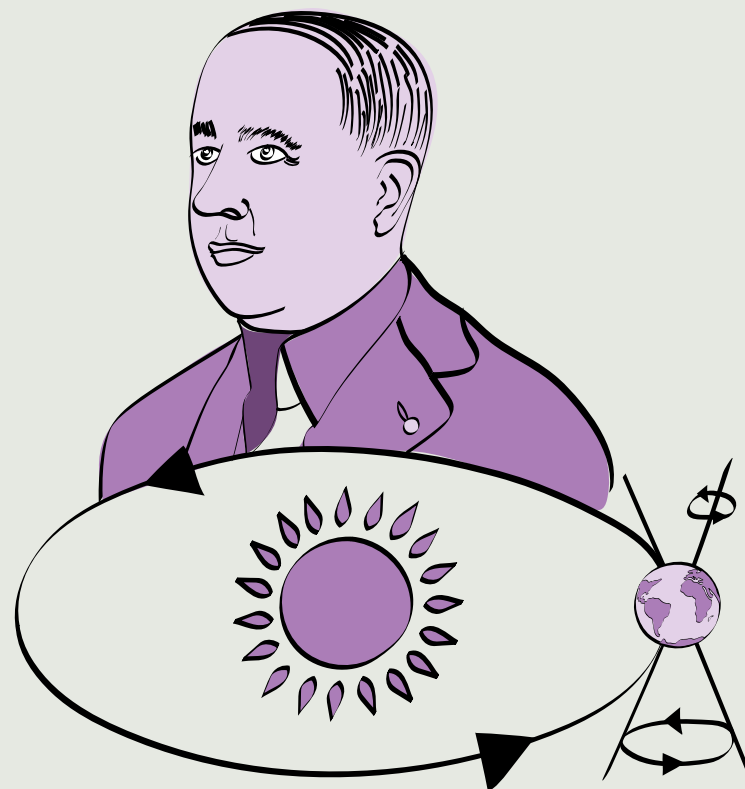


## Os ciclos de Milankovitch

Um dos principais fatores naturais de mudanças no clima é a posição da Terra em relação ao Sol. Foi o cientista sérvio Milutin Milankovitch (1879-1958) quem chegou a essa conclusão, descobrindo variações periódicas na órbita, na orientação e na maneira como o planeta gira que mergulharam o globo em eras glaciais e períodos quentes no passado.

Nascido em uma vila rural chamada Dalj, na Áustria-Hungria – atualmente parte da Croácia –, Milankovitch iniciou a carreira como engenheiro. Ele foi responsável por diversas construções de concreto armado no Império Austro-Húngaro, tornando-se depois professor de matemática na Universidade de Belgrado, na Sérvia.

Com o assassinato do arquiduque Francisco Ferdinando por um terrorista sérvio em 1914, a Sérvia foi decretada inimiga do império e Milankovitch foi preso durante toda a Primeira Guerra Mundial.



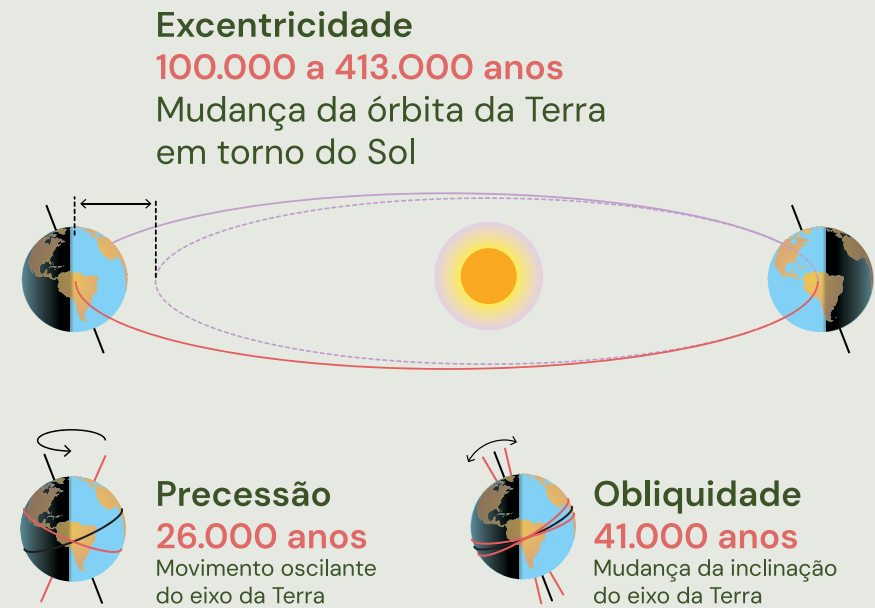
Naquele período iniciou suas pesquisas, fazendo cálculos à mão, sobre como as variações periódicas em três tipos de movimentos orbitais da Terra – excentricidade (quão mais ovalada ou circular é a órbita da Terra em torno do Sol, o que varia a cada 100 mil ou 400 mil anos), obliquidade (mudança da inclinação do eixo da Terra) e precessão (o “bamboleio” da Terra em torno de seu eixo, como um pião que perde velocidade) – afetam a quantidade de radiação solar que atinge o planeta. Essas variações ficaram conhecidas como Ciclos de Milankovitch.

Milankovitch concluiu que as variações na radiação solar em determinadas latitudes e estações são mais relevantes para o avanço e o recuo das geleiras do que outras. Por exemplo, quando esses ciclos fazem com que as latitudes do hemisfério norte recebam menos energia solar durante o verão, as camadas de gelo começam a se expandir. Lembra que a cor branca do gelo reflete mais energia solar de volta ao espaço? Assim, conforme as camadas congeladas aumentam, mais energia é refletida, gerando um “feedback” positivo que intensifica o resfriamento regional.

Além disso, Milankovitch considerou a obliquidade como o ciclo mais relevante, pois afeta diretamente a quantidade de insolação nas regiões de alta latitude no hemisfério Norte durante o verão. Este hemisfério é mais importante para o controle do clima porque tem mais terras emersas a serem cobertas de gelo.

Os cálculos de Milankovitch indicam que as eras do gelo ocorrem aproximadamente a cada 41 mil anos. Pesquisas posteriores confirmaram que as glaciações seguiram esse intervalo entre um e três milhões de anos atrás, na época do Pleistoceno, da era Cenozóica.

Os ciclos de Milankovitch



Fonte: Nasa

Embora os estudos de Milankovitch tenham sido apoiados por alguns pesquisadores de sua época, sua teoria só se difundiu amplamente na comunidade científica global entre o final da década de 1960 e 1970, após sua morte. Em 1976, por exemplo, um estudo que analisou sedimentos marinhos concluiu que os ciclos de Milankovitch correspondem a períodos de grandes mudanças climáticas nos últimos 450 mil anos.

Se as variações orbitais são tão importantes, como os cientistas sabem que elas não têm relação com o aquecimento global atual? A Nasa, a agência espacial americana, ressalta alguns pontos importantes sobre isso:

**1. Escala de tempo:** Os ciclos de Milankovitch operam em escalas de tempo muito longas, entre dezenas de milhares e centenas de milhares de anos. Nos últimos 150 anos, os ciclos não alteraram significativamente a quantidade de energia solar absorvida pela Terra. Houve um pequeno aumento na radiação solar no século 20. No entanto, observações de satélite da NASA mostram que, nos últimos 40 anos, a radiação solar diminuiu ligeiramente.

**2. Outros fatores:** Os ciclos de Milankovitch não são os únicos a influenciar as mudanças climáticas. Alterações na extensão das camadas de gelo e na concentração de dióxido de carbono foram fatores cruciais nas flutuações de temperatura dos últimos milhões de anos.

**3. Influência humana:** Há um alto grau de certeza de que o aumento atual na concentração de CO<sub>2</sub> se deve principalmente às atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis. Isso é confirmado pela “impressão digital” química do carbono emitido por esses combustíveis, identificável pelos instrumentos de medição.

**4. Gases de efeito estufa versus o Sol:** Desde 1750, o aquecimento causado pelos gases de efeito estufa emitidos pela queima de combustíveis fósseis é mais de 50 vezes maior do que o leve aquecimento solar ocorrido no mesmo período.

**5. Distribuição do aquecimento:** Se o aquecimento atual fosse causado pelo Sol, haveria um aumento de temperatura tanto na troposfera, a camada atmosférica próxima à superfície, quanto na estratosfera, que está logo acima. No entanto, observações de balões e satélites mostram que apenas a superfície terrestre e a troposfera estão aquecendo.

Além disso, um estudo publicado em fevereiro de 2025 indicou que, sem a interferência humana na atmosfera, a atual estabilidade climática dada pelas variações orbitais da Terra fosse durar pelo menos mais 11 mil anos.



02c

# A era da estabilidade: o Holoceno

O final do último período glacial, há cerca de 11.700 anos, marca o início do Holoceno – o atual período da história da Terra, chamado pelos cientistas de “O Longo Verão”. A era é considerada especial porque, diferentemente das anteriores, não tem variações climáticas naturais abruptas. Foi justamente essa estabilidade que permitiu a fixação de comunidades humanas (pondo fim ao nomadismo como principal modo de vida do Homo sapiens), o desenvolvimento da agricultura e florescimento da civilização humana. O Holoceno é considerado um período relativamente quente entre eras do gelo.

O Holoceno marca também o desenvolvimento da contradição que está na base da crise do clima. Foram as condições climáticas estáveis que permitiram que a civilização humana se desenvolvesse de maneira única neste período; mas, esse desenvolvimento, da forma como tem ocorrido, é o que tem destruído a estabilidade do clima. Como você verá adiante, as atividades humanas que emitem gases de efeito estufa determinaram um outro nível de interação entre organismos e o ambiente, desbalanceando a equação do clima.





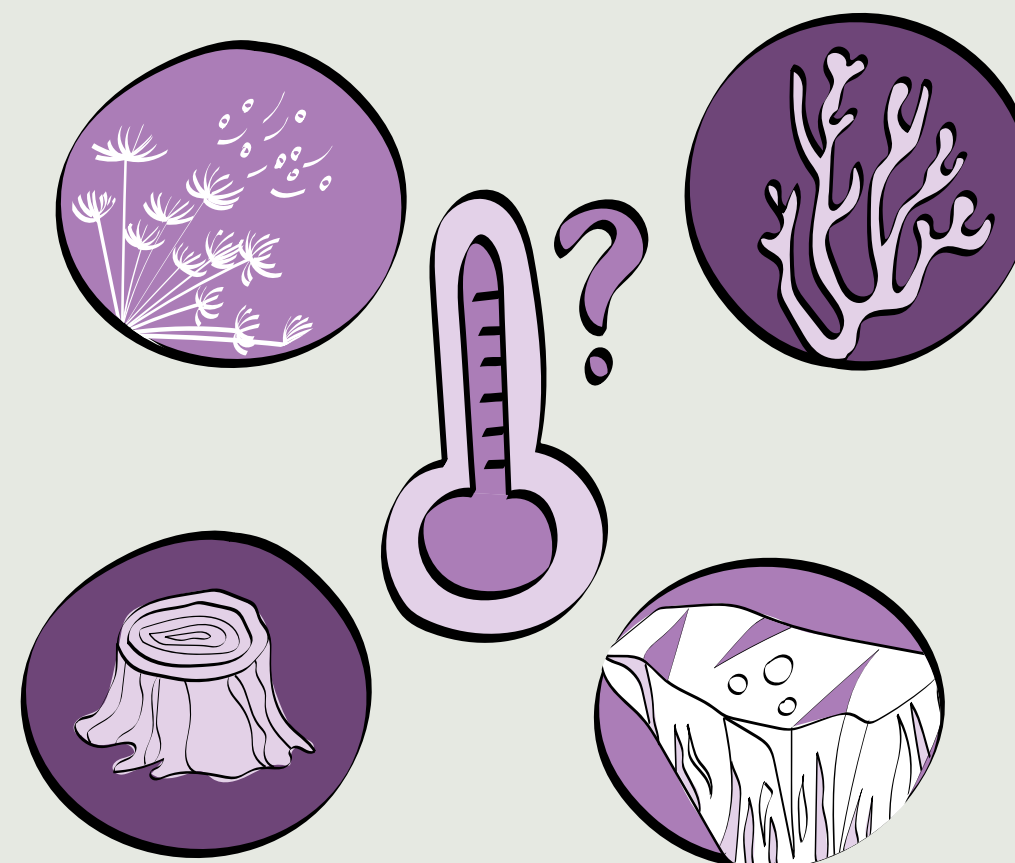
## Como desvendar o clima antigo

Entender o que aconteceu com o clima há centenas, milhares ou mesmo milhões de anos é fundamental para a ciência climática do presente. Entendendo as mudanças climáticas do passado, os cientistas podem identificar suas causas, as respostas dos ecossistemas às variações e diferenciar o que foi fruto de uma variabilidade natural daquilo que foi causado por interferência das atividades humanas. Isso tem papel imprescindível na compreensão das mudanças climáticas atuais e na elaboração dos modelos climáticos, que projetam as mudanças futuras. Mas como calcular temperaturas, regimes de chuvas, ventos e outros indicadores de épocas tão remotas, quando não havia termômetros nem satélites (ou mesmo antes do próprio surgimento da humanidade)? Para essa tarefa, os cientistas contam com aliados: anéis de árvores, corais, pólen, cavernas e bolhas de ar presas no gelo polar, entre outros, guardam informações valiosas sobre o clima e são objeto de investigação da chamada paleoclimatologia.

Esses vestígios analisados pela paleoclimatologia são chamados de proxies. A análise das características físicas, químicas e biológicas desses registros geológicos permitem que se reconstrua condições climáticas passadas para investigação. Há ainda outro tipo de proxies, que são documentos históricos: diários de viajantes, jornais e registros de agricultores, entre outros, também são utilizados como fontes para esse tipo de levantamento.

A análise dos anéis de árvores, por exemplo, é valiosa porque as condições climáticas influenciam diretamente o seu crescimento, registrado nesses anéis. A observação da composição química dessas formações, assim como de sua densidade e dos padrões de largura dos anéis, traz informações únicas sobre as variações climáticas passadas, ao longo dos anos de crescimento da árvore. Já a investigação dos esqueletos dos corais permite que se reconstrua o clima em que eles viveram. Esses esqueletos são formados por carbonato de cálcio (um mineral extraído da água do mar), e têm sua densidade impactada pela temperatura da água, as condições de luz e os nutrientes disponíveis durante sua formação. Assim, estudando a densidade dos corais, os cientistas podem saber como essas variáveis se apresentavam em épocas passadas.

O pólen, outro importante proxy, fica depositado nas camadas de sedimentos no fundo de lagos e traz informações sobre o tipo de planta da qual vieram. Assim, os cientistas podem conhecer os tipos de vegetação que cresciam no momento em que o sedimento foi depositado e, a partir daí, analisar o clima daquele período. Há, ainda, o estudo dos chamados testemunhos de gelo: os cientistas acessam o gelo localizado no alto de montanhas e nos polos e o perfuram. Formado a partir da queda de neve que foi transformada em gelo ao longo dos anos, ele consegue preservar essas informações que podem ser de décadas passadas a até mais de um milhão de anos atrás. Essa perfuração revela diferentes camadas do gelo que, além de preservar informações como temperatura e fonte de umidade de neves passadas, também preserva características atmosféricas nas suas bolhas de ar, como aerossóis continentais e marinhos, poeira vulcânica e até contaminantes antrópicos dispersados pelo ar. Analisando a composição química dessas amostras, os cientistas conseguem reconstruir de forma extremamente precisa as temperaturas do passado.





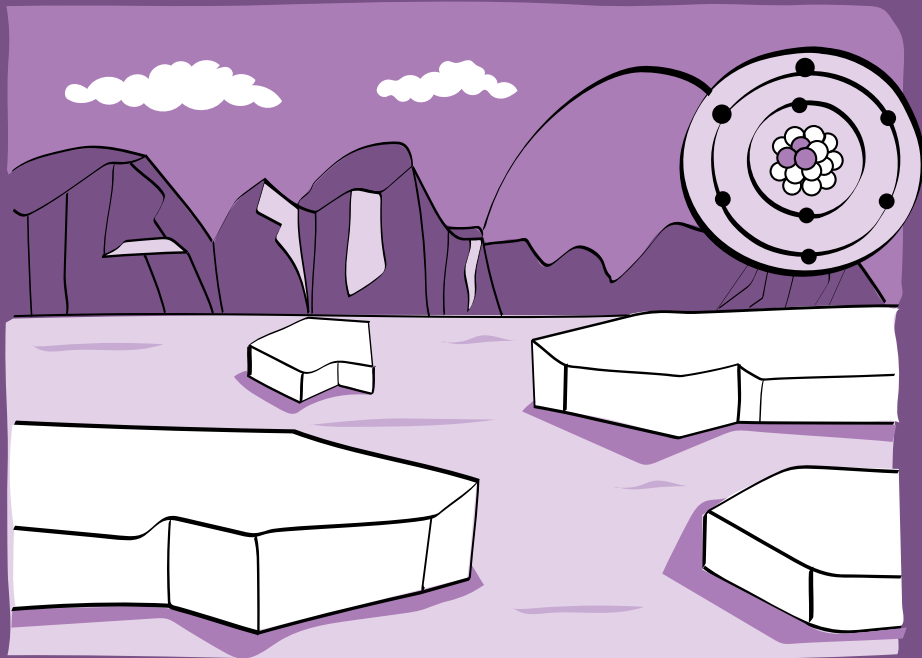
# O PALEOTERMÔMETRO DE GELO

A análise de testemunhos de gelo da Antártida permitiu aos cientistas fazer reconstruções do clima da Terra no último milhão de anos. Isso ocorreu graças a uma descoberta feita nos anos 1950: a de que a água que se deposita em forma de chuva ou neve tem composição química distinta conforme a temperatura.

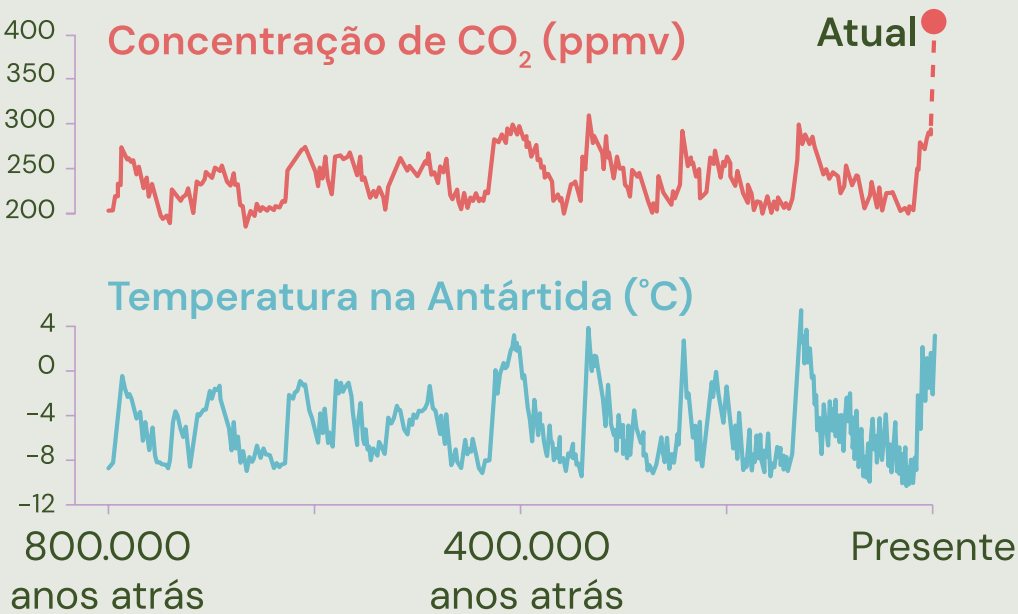
O átomo de oxigênio, como todos os outros, possui “sabores” distintos, conhecidos como isótopos. Ele pode ter 16, 17 ou 18 nêutrons em seu núcleo ( $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ ). Quando evapora no mar, o vapor de água apresenta uma determinada proporção entre oxigênio -16 e oxigênio -18, que vai mudando conforme a temperatura diminui. O  $\text{O}^{18}$ , por ser mais pesado, precipita primeiro. Por isso, ao se aproximar dos polos, o vapor passa a ter uma menor proporção desse isótopo.

Aplicando esse “paleotermômetro” a amostras de gelo antártico, os cientistas conseguiram descobrir como a temperatura no continente variou de ano a ano. Examinando as bolhas de ar presas no gelo, eles conseguiram inferir o teor de gases-estufa na atmosfera em cada período.

Os resultados dessas coletas indicam que as concentrações de  $\text{CO}_2$  atuais só encontram paralelo no Plioceno, há 3 milhões de anos. No caso dos registros de temperatura, a última vez em que a Terra esteve tão quente foi há cerca de 125 mil anos.

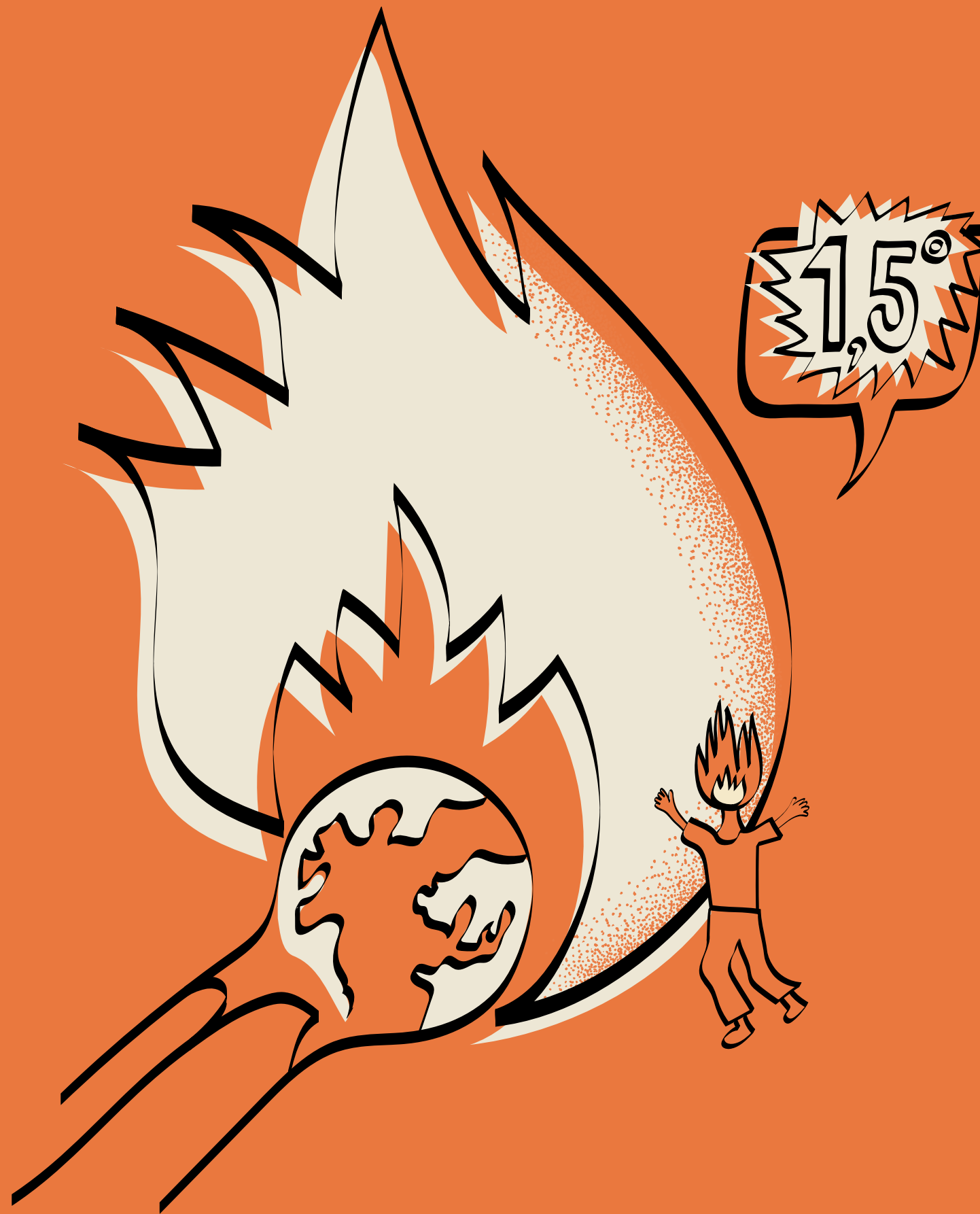


Comparação dos níveis de  $\text{CO}_2$  com base na análise de gelo da Antártica



Fonte: Dados baseados em estudos de Lüthi et al. (2008, Nature) e Jouzel et al. (2007, Science), com informações sobre os níveis de  $\text{CO}_2$  de 2024 Nasa.

# O aquecimento global

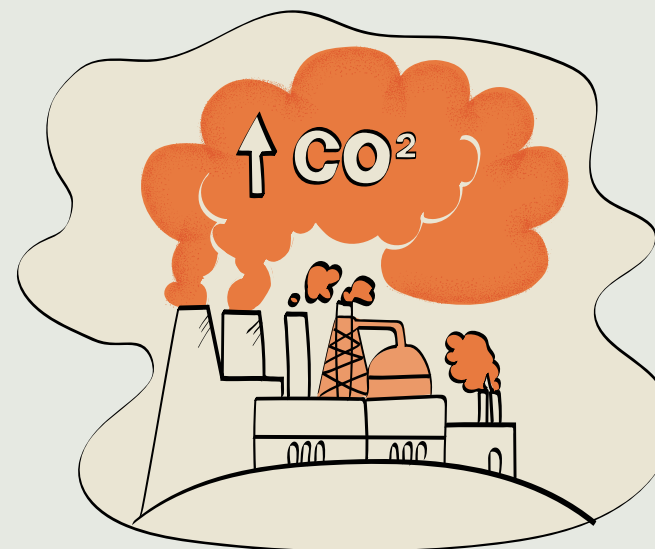
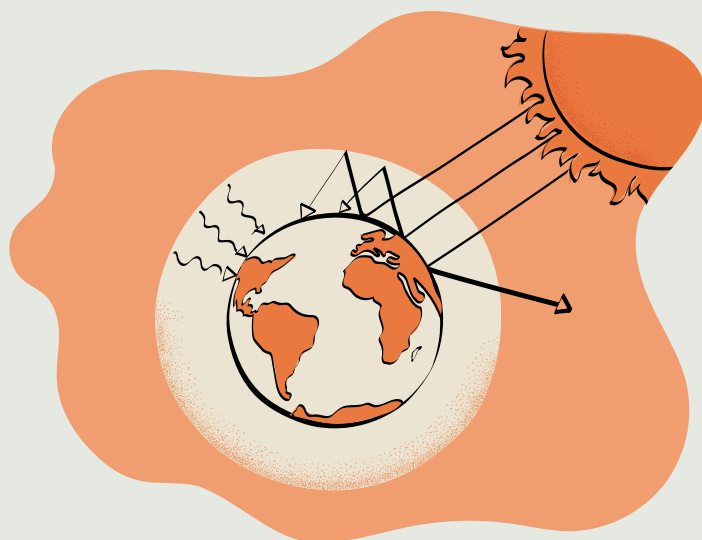


## A descoberta da crise (e dos culpados)

As primeiras descobertas da ciência sobre o fenômeno que ficaria conhecido como aquecimento global datam de meados do século 19. Como em toda produção de conhecimento científico, esse foi um caminho longo, com idas e vindas, deduções e comprovações, e construído a muitas mãos. Essa trilha começa com Jean-Baptiste Fourier: em 1824, o físico e matemático francês, integrante do Exército de Napoleão, analisou o balanço energético do planeta e percebeu que algo fazia a temperatura da superfície da Terra ser mais alta do que indicavam os cálculos que compreendiam apenas a incidência de radiação solar como fonte de calor.

Considerando o tamanho do planeta, sua distância do Sol e a radiação emitida, a temperatura da superfície deveria ser muito mais baixa do que a observada na realidade. Isso levou Fourier a deduzir que uma parte da radiação infravermelha (então chamada de “calor obscuro”) era retida pela atmosfera. O francês não conseguiu provar essa hipótese, mas abriu ali o caminho para a descoberta do efeito estufa.

O passo seguinte — e decisivo — foi dado por Eunice Foote, cientista americana que, em 1856, descobriu que alguns gases presentes na atmosfera, como o  $\text{CO}_2$  e o vapor d'água, são responsáveis por reter o calor e irradiá-lo de volta à superfície. E mais: indicou que mudanças nas concentrações desses gases na atmosfera impactaram em mudanças no clima do planeta.



O preconceito contra mulheres na ciência fez com que as descobertas de Foote caíssem no esquecimento por mais de um século. Foi somente nos anos 2000 que um conjunto de pesquisas aprofundou o entendimento sobre a dimensão de sua obra. Hoje, seu trabalho é finalmente reconhecido como pioneiro na identificação dos gases-estufa. O Observatório do Clima batizou sua plataforma de informação climática de Eunice em homenagem à cientista.

Poucos anos depois de Foote, em 1859, o físico irlandês John Tyndall mediu a capacidade da atmosfera terrestre de absorver radiação infravermelha e identificou o papel do vapor d'água, do dióxido de carbono e do óxido nitroso nesse processo, descobrindo “oficialmente” o efeito estufa.

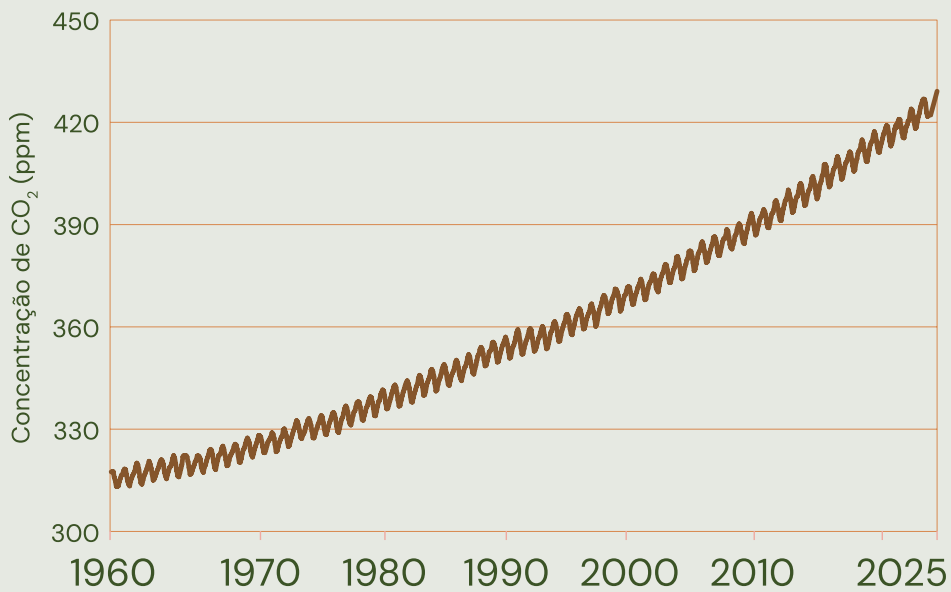
Em 1896, mais um avanço crucial foi feito pelo químico sueco Svante Arrhenius. Em meio a um divórcio, passando longas horas no laboratório, ele fez uma série de medições que produziram a primeira estimativa do impacto climático da duplicação da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera. Concluiu que o resultado seria um planeta  $5^\circ\text{C}$  ou  $6^\circ\text{C}$  mais quente. Hoje os cientistas estimam que a sensibilidade climática, como é conhecido esse parâmetro, esteja em torno de  $3^\circ\text{C}$ . Num segundo trabalho, com um colega, Arrhenius estimou que a queima dos estoques de carvão mineral conhecidos à época poderia aquecer a atmosfera a ponto de transformar a Suécia num país tropical.

A prova de que Arrhenius tivera a intuição certa veio em 1938. Guy Callendar, um engenheiro inglês, soou o alarme ao demonstrar que as temperaturas da superfície

terrestre haviam aumentado nos 50 anos anteriores, sendo a produção de dióxido de carbono pela combustão de combustíveis fósseis responsável por grande parte desse aquecimento. Em 1958, o mesmo Callendar apontou que a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera havia aumentado mais de 10% entre 1900 e 1956. Pela primeira vez, relacionava-se concretamente o aquecimento global ao aumento da concentração atmosférica do gás-estufa. As sociedades científicas britânicas rejeitaram o trabalho, dizendo que Callendar não era cientista.

Já em 1957, as descobertas de Roger Revelle, oceanógrafo americano, ajudaram a mudar a percepção sobre a gravidade do aquecimento. Revelle mostrou que, ao contrário do que se pensava até então, os oceanos não seriam capazes de absorver o CO<sub>2</sub> emitido por atividades humanas. No ano seguinte, um ex-aluno de Revelle chamado Charles Keeling começou a medir as concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera mais pura possível, o topo de um vulcão no Havaí a quase 3.400 metros de altitude. A chamada “curva de Keeling” forneceria aos cientistas a confirmação: deu ruim. As consequências da emissão de gases de efeito estufa pela sociedade industrial não passariam incólumes.

Curva de Kelling: média da concentração de CO<sub>2</sub>



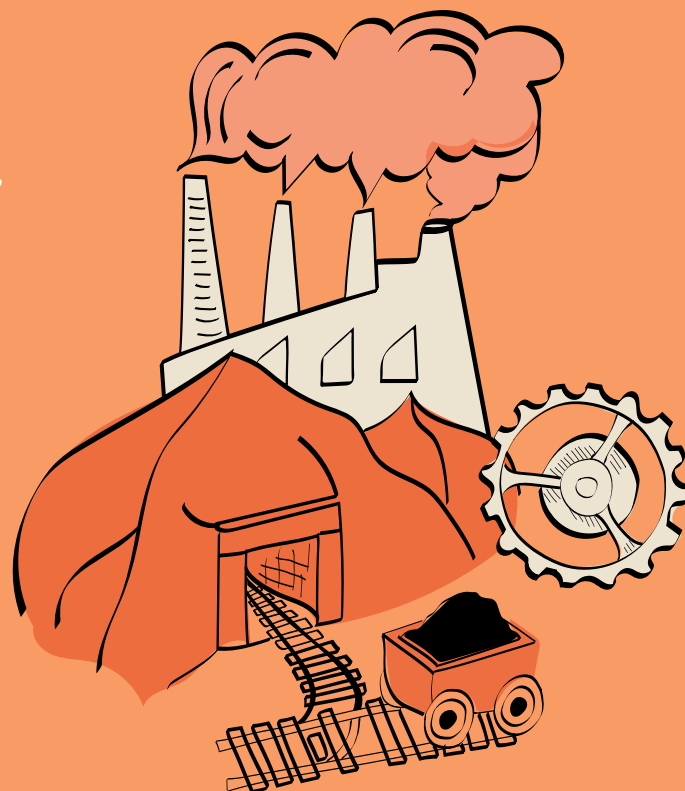
Fonte: Universidade da Califórnia, San Diego (UC San Diego) e Instituto Scripps de Oceanografia



# As descobertas da ciência climática em quase 200 anos

## 1760

Manufaturas com máquinas a vapor movidas a carvão mineral começam a funcionar no Reino Unido, inaugurando a Revolução Industrial.



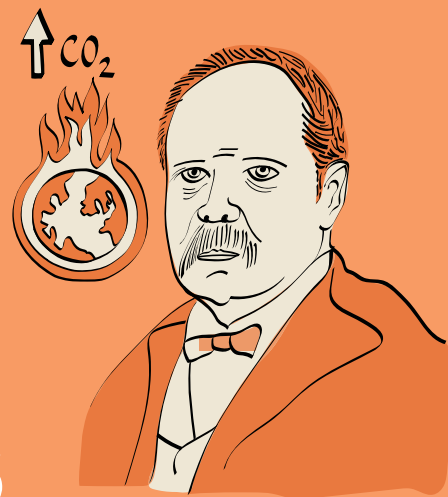
## 1856

A americana Eunice Foote descobre que essa “alguma coisa” imaginada por Fourier eram gases presentes na atmosfera, como o vapor d’água (H<sub>2</sub>O) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

## 1824

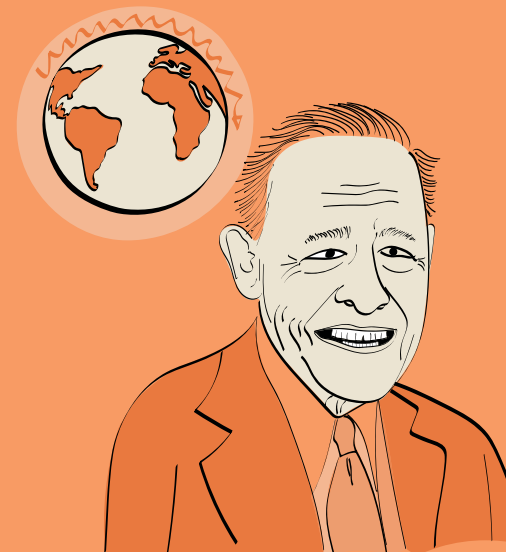
Jean-Baptiste Fourier publica estudo nos Anais da Academia Real de Ciências da França mostrando que a Terra absorve “calor luminoso” do Sol e o irradia na forma de “calor obscuro” (radiação infravermelha). Teoriza que alguma coisa na atmosfera deveria reter o “calor obscuro” e aquecer o planeta, que do contrário seria uma bola de gelo.





# 1896

O sueco Svante Arrhenius calcula pela primeira vez o efeito do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> no aquecimento e afirma, empolgado, que a queima das reservas conhecidas de carvão poderia tornar o clima da Escandinávia agradável.

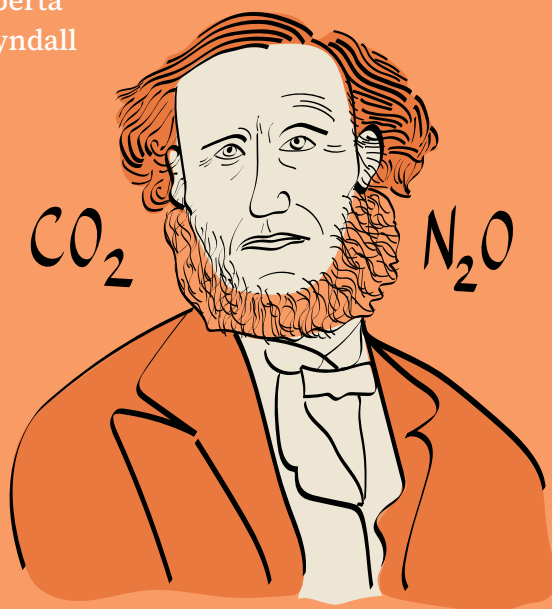


# 1957

O oceanógrafo americano Roger Revelle e o químico austríaco Hans Suess publicam um artigo mostrando que o mar não absorve o carbono em excesso emitido por atividades humanas; este ficaria na atmosfera e poderia esquentar a Terra.

# 1859

O irlandês John Tyndall publica experimentos demonstrando que CO<sub>2</sub> e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) bloqueiam radiação infravermelha. Seus trabalhos são considerados a descoberta do efeito estufa. É incerto se Tyndall conhecia os estudos de Foote.



# 1938

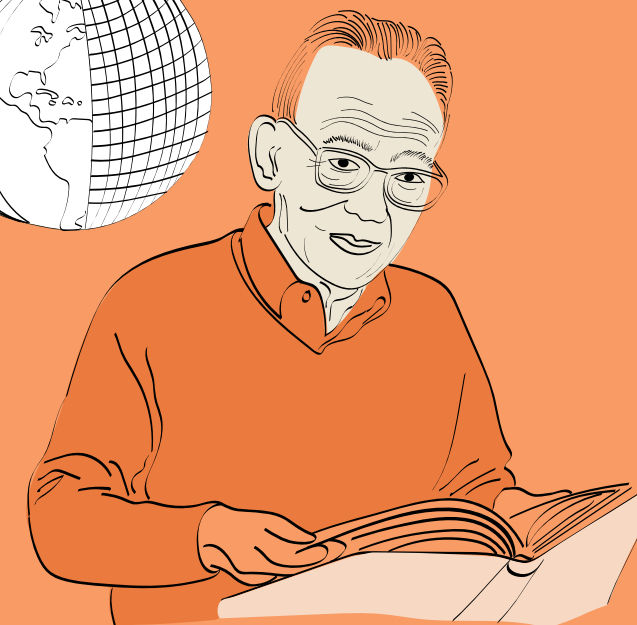
O engenheiro inglês Guy Callendar demonstra que o mundo já estava mais quente e sugere que isso estava acontecendo, em grande parte, devido à produção de dióxido de carbono pela queima de combustíveis fósseis.





# 1975

Wallace Broecker, oceanógrafo da Universidade Columbia (EUA), usa pela primeira vez na literatura científica a expressão “aquecimento global”.



# 1975

O japonês Syukuro Manabe cria o primeiro modelo climático computacional, mostrando que o planeta aqueceria alguns graus caso a concentração de CO<sub>2</sub> aumentasse.

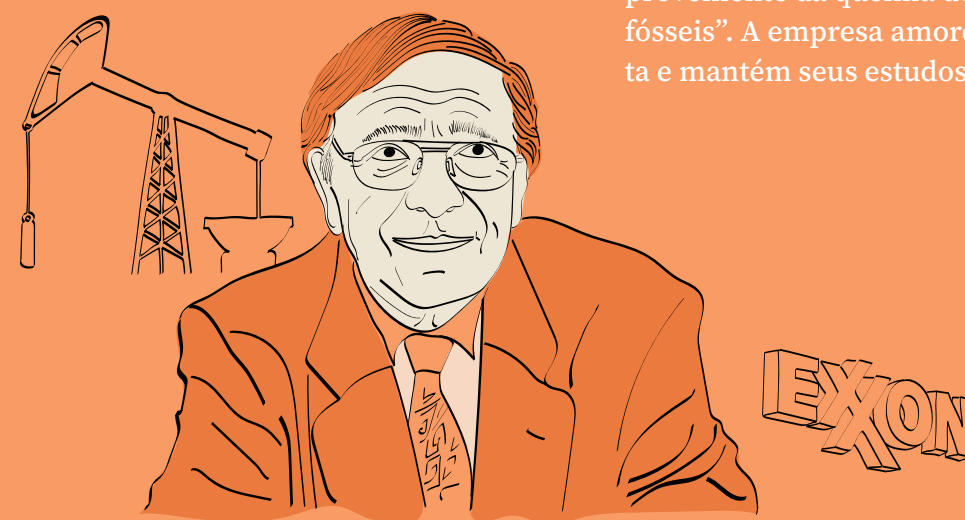
# 1958

Charles David Keeling inicia medições da concentração de CO<sub>2</sub> no alto do vulcão Mauna Loa, no Havaí, e descobre que Revelle e Suess estavam certos: as concentrações desse gás não param de aumentar.



# 1977

O cientista James Black diz à diretoria da petroleira americana Exxon que “há consenso científico geral de que a maneira mais provável pela qual a humanidade influencia o clima é por meio da emissão de dióxido de carbono proveniente da queima de combustíveis fósseis”. A empresa amordaça o cientista e mantém seus estudos sob segredo.

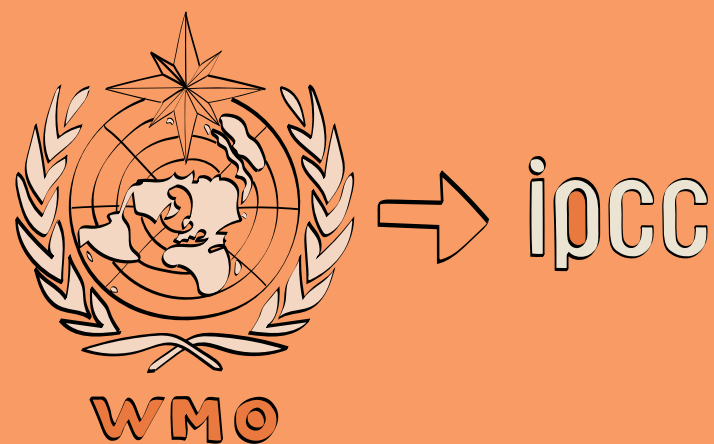




# 1988

O americano James Hansen fala no Senado dos EUA sobre um artigo científico que publicaria em breve e diz que o mundo já está aquecendo e que há “99% de chance” de que a humanidade seja responsável. O New York Times estampa em sua manchete: “O aquecimento global começou”.

A Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, ambos da ONU, criam o IPCC, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.



# 1990

O IPCC publica seu Primeiro Relatório de Avaliação (FAR), afirmando que já existe um aquecimento global perceptível, mas que ele ainda não pode ser distinguido da variabilidade natural do clima.

# 1992

No Rio de Janeiro, os países-membros da ONU adotam a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, a UNFCCC. Seu objetivo é evitar a “interferência perigosa” da humanidade no clima.



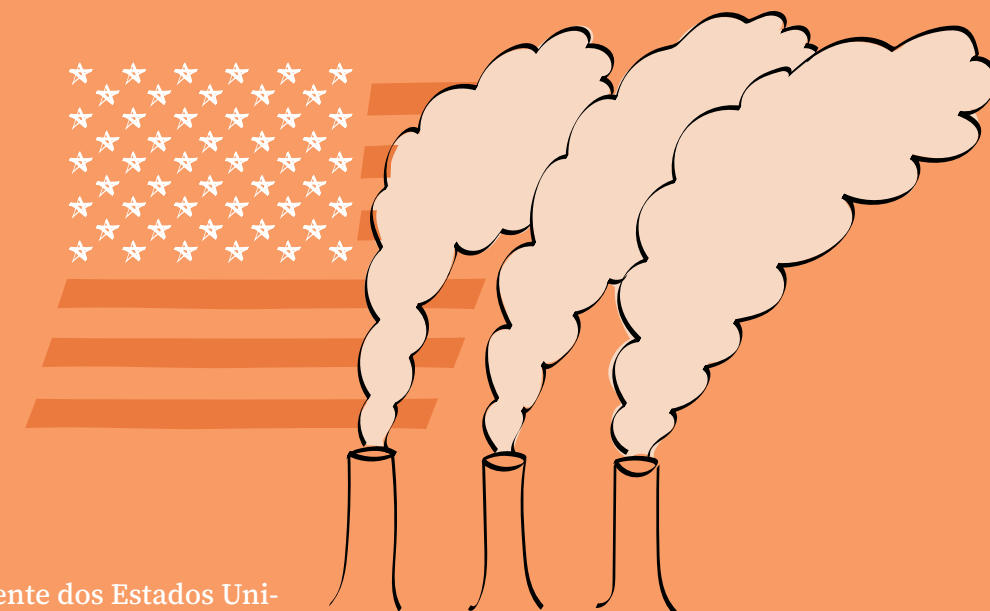
# 1997

Em Kyoto, Japão, na 3ª Conferência das Partes da UNFCCC (COP3), é adotado um protocolo à convenção que determina que os países industrializados precisam cortar 5,2% de suas emissões de gases de efeito estufa até 2012, em relação a 1990. O Protocolo de Kyoto é o primeiro tratado mundial prevendo o corte de emissões



# 2001

George W. Bush, presidente dos Estados Unidos, anuncia que o país, maior emissor histórico de carbono, não ratificará o Protocolo de Kyoto, e mata o acordo.



# 2007

O IPCC publica o Quarto Relatório de Avaliação (AR4) e declara: “o aquecimento global é inequívoco”. O trabalho dá ao painel o Prêmio Nobel da Paz, dividido com o ex-vice-presidente dos EUA Al Gore.





# 2009

A UNFCCC realiza em Copenhague, Dinamarca, a 15ª Conferência das Partes, a COP15, com o objetivo de fechar um novo acordo climático para substituir o Protocolo de Kyoto. É o maior encontro de chefes de Estado da história. A conferência fracassa e termina com uma fraca declaração política.



# 2015

Na COP21, em Le Bourget, nos arredores de Paris, é adotado o primeiro acordo climático com metas de corte de emissões para todos os países, o Acordo de Paris. Ele se compromete a limitar o aquecimento global “bem abaixo de 2°C” em relação à era pré-industrial e a “envidar esforços” para limitá-lo a 1,5°C.



# 2019

Inspirados pela ativista sueca Greta Thunberg, milhões de pessoas marcham no mundo inteiro em defesa do clima, na maior manifestação do gênero.



# 2021

O IPCC lança o Sexto Relatório de Avaliação, no qual estabelece que “é inequívoco que a influência humana aqueceu a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre”. Do aquecimento de 1,09°C observado atualmente (2011-2020) em comparação com o período pré-industrial (1850-1900), 1,07°C provavelmente deriva de ações humanas.

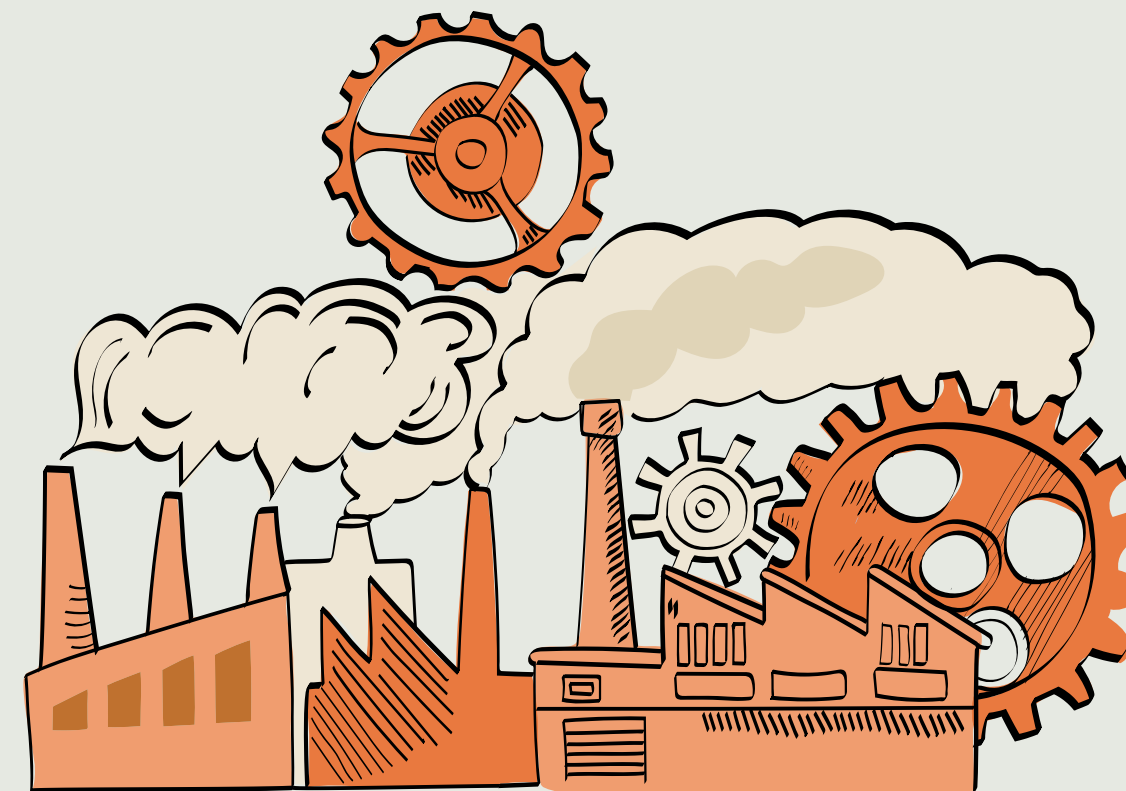


## Revolução Industrial

O ponto de virada definitivo na história da emissão de gases de efeito estufa pelas atividades humanas veio com a Revolução Industrial. Iniciada no final do século 18 no Reino Unido, o que se chama de Revolução Industrial foi, na verdade, um processo longo de profundas transformações econômicas, políticas e sociais que se expandiu para outros países da Europa e depois globalmente, mas de maneira bastante desigual.

A introdução das máquinas nos sistemas produtivos permitiu a produção em larga escala, alterando as dinâmicas de crescimento econômico, enriquecimento e empobrecimento da população. Mudaram também as relações de trabalho (com a formação de grandes contingentes de trabalhadores concentrados em fábricas), a ocupação dos territórios (dando início à urbanização) e, mais amplamente, o conjunto das relações sociais.

O processo inaugurou também a dependência de combustíveis fósseis, inscrita na base dos novos sistemas de produção para alimentar as máquinas. As primeiras manufaturas da indústria têxtil com máquinas a vapor começaram a funcionar na Inglaterra por volta de 1760, movidas a carvão mineral.



O carvão (mineral e vegetal) foi a principal fonte de energia das indústrias até a metade do século 19. A partir de 1850, o petróleo e seus derivados se tornam dominantes como fonte de energia. Atualmente, mesmo com o desenvolvimento das fontes renováveis, os combustíveis fósseis ainda representam 80% da matriz energética global, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês).

A Revolução Industrial marca, então, o início da utilização dos fósseis em larga escala e, consequentemente, o crescimento exponencial da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. No período pré-industrial, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera era 280 partes por milhão (ppm, medida da proporção de moléculas de CO<sub>2</sub> em relação às outras moléculas na atmosfera).

Um relatório do IPCC mostrou que, em 2019, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera chegou a 410 ppm, a maior em pelo menos 2 milhões de anos. O recorde, no entanto, já foi quebrado mais de uma vez desde então: em junho de 2024, chegou-se à marca de 426,9 ppm.

Uma análise de 2021 do Carbon Brief ilustra as responsabilidades dos países na emissão de gases-estufa historicamente, desde o início do período industrial. O primeiro lugar é dos Estados Unidos, que despejaram mais de 509 GtCO<sub>2</sub> na atmosfera desde 1850, representando cerca de 20% das emissões históricas globais. Na sequência vêm China (11%) e Rússia (7%), seguidas por Brasil (5%) e Indonésia (4%), que entram na lista por conta das emissões de desmatamento.

Emissões históricas

Emissões acumuladas de CO2 geradas por combustíveis fósseis, uso do solo e florestas (1850 - 2021)

| País          | CO <sub>2</sub> (bilhões de toneladas) |
|---------------|----------------------------------------|
| EUA           | 509,1                                  |
| China         | 284,5                                  |
| Rússia        | 172,2                                  |
| <b>Brasil</b> | 112,9                                  |
| Indonésia     | 102,6                                  |
| Alemanha      | 88,5                                   |
| Índia         | 85,7                                   |
| Reino Unido   | 74,3                                   |
| Japão         | 68,0                                   |
| Canadá        | 65,5                                   |

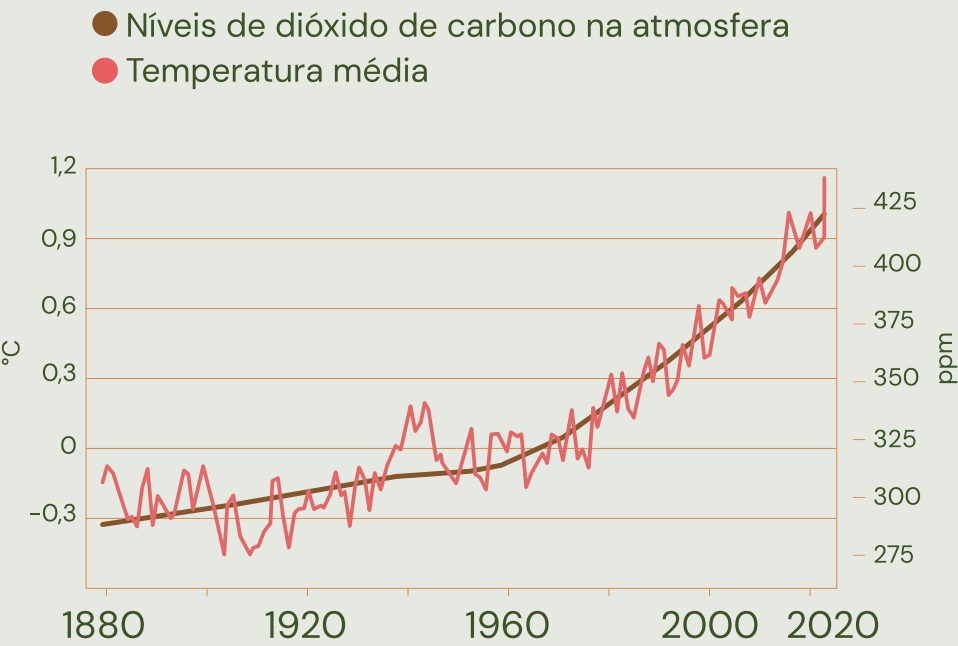
Fonte: Carbon Brief

03c

As causas do aquecimento global

A partir da confirmação de que a emissão de gases de efeito estufa é responsável pelo aquecimento do planeta, a ciência seguiu avançando para entender como — e com que intensidade — as atividades humanas despejam os gases responsáveis pela crise do clima na atmosfera. O consenso científico hoje é de que os principais vilões do clima são os combustíveis fósseis — petróleo, gás e carvão —, principalmente utilizados para a geração de energia.

Correlação entre a concentração de CO<sub>2</sub> e a anomalia média da temperatura

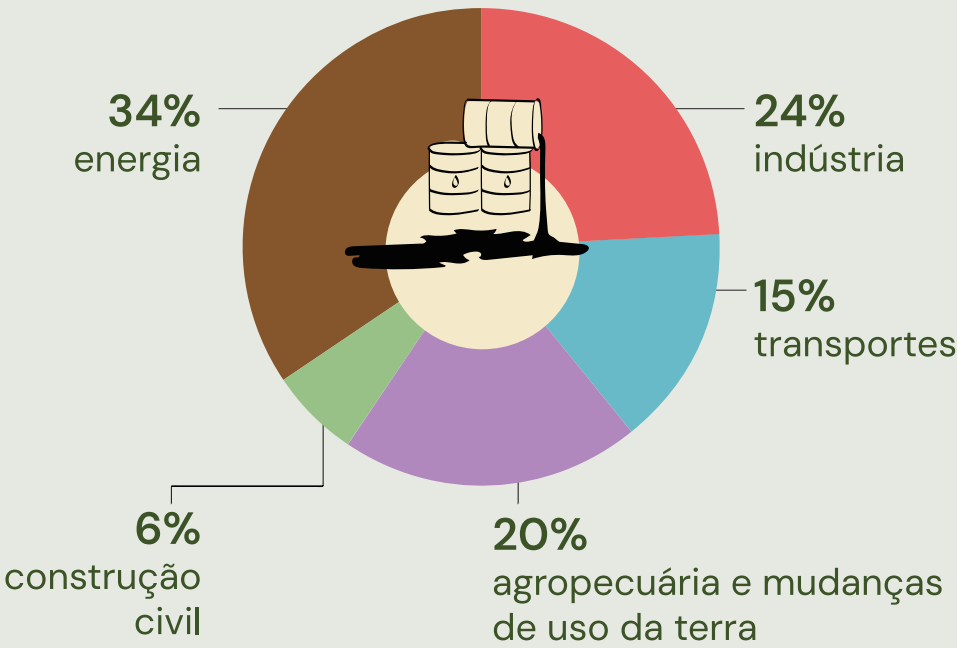


Fonte: Nasa/GISS e NOAA, com medida do Observatório Mauna Loa

A eletricidade ainda é fortemente dependente de fontes fósseis globalmente. Segundo a Agência Internacional de Energia, mais de 60% da eletricidade no mundo é obtida a partir dessas fontes. Além disso, os fósseis são queimados para gerar calor — usado no aquecimento de residências e em processos industriais — e para

abastecer meios de transporte a combustão interna (como carros, ônibus e caminhões). Todos esses processos emitem, principalmente, CO<sub>2</sub>. Mas não só: liberam também metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), outros gases de efeito estufa.

Principais emissores de gases-estufa



Fonte: Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC.

Poderoso gás de efeito estufa, o metano (CH<sub>4</sub>) é o segundo maior responsável pelo aquecimento global, ficando atrás do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). É classificado como um poluente climático de vida curta, já que seu tempo de vida na atmosfera é de aproximadamente 12 anos, contra milhares do CO<sub>2</sub>. No entanto, o potencial de esquentar o planeta de cada tonelada de metano é 28 vezes maior do que o de uma tonelada de CO<sub>2</sub>.

A concentração atmosférica do metano mais que dobrou desde os tempos pré-industriais. Em 2020, as emissões globais de metano representaram 16% do total de emissões de gases de efeito estufa, calculadas em dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e). O metano também contribui para a formação de ozônio (O<sub>3</sub>) na troposfera.

O metano também contribui para a formação de ozônio (O<sub>3</sub>) na troposfera. Este último gás também é um poderoso gás-estufa de curta duração, além de ser um poluente atmosférico com efeitos prejudiciais para a saúde humana, os ecossistemas e a agricultura. A ciência aponta que a redução de emissões de metano é uma boa estratégia para controlar o ritmo das mudanças climáticas no curto prazo, dado o elevado potencial de aquecimento e a menor duração na atmosfera do gás.

Segundo o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, em 2019 cerca de 80% das emissões globais de gases-estufa vieram dos setores de energia, transporte e construção somados (sendo 34% do setor de energia, 24% da indústria, 15% dos transportes e 6% da construção civil). Os cerca de 20% restantes vieram da agropecuária e das mudanças de uso da terra, como o desmatamento. Apesar de não serem a maioria globalmente, essas atividades dominam os perfis de emissões de alguns países — como o Brasil.

A derrubada de vegetação e as queimadas liberam o carbono armazenado nas árvores e nos solos. Já as da agropecuária são as provenientes da digestão feita por rebanhos de animais ruminantes (processo conhecido como “arroto do boi”, que emite gás metano), do tratamento e da disposição dos dejetos desses animais, do cultivo de arroz sobre o regime irrigado, da queima dos resíduos agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar e algodão e do manejo dos solos agrícolas com uso de insumos. O desmatamento e a degradação florestal comprometem ainda a função das florestas como “sumidouros” de carbono (que ocorre naturalmente quando, através da fotossíntese, as árvores capturam CO<sub>2</sub> para sua produção de energia), aumentando ainda mais a concentração do gás na atmosfera.

Enquanto, no mundo, a agropecuária e o desmatamento são responsáveis por cerca de 20% das emissões, no Brasil o cenário praticamente se inverte: mais de 70% das emissões brutas do país vêm dos setores de mudanças no uso da terra (quase metade do total) e agropecuária (mais de um quarto do total), segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), do Observatório do Clima.



# ENCHENDO O TANQUE COM DINOSSAUROS? O QUE SÃO COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

O carbono existente na Terra é tão antigo quanto o planeta. Ele se originou da explosão de uma estrela bilhões de anos atrás e se tornou matéria-prima para a vida por aqui. Todo o carbono que há no mundo é o mesmo que havia quando o planeta se formou — ele só muda de lugar.

Moléculas orgânicas, como proteínas, DNA e a celulose de plantas são todas baseadas em carbono. Esse átomo ocorre em rochas, no magma das profundezas da Terra e também no ar, combinado com o oxigênio para formar o dióxido de carbono, ou CO<sub>2</sub>. Durante a fotossíntese, plantas e algas retiram gás carbônico do ar para fixá-lo na biomassa, em forma de folhas, raízes ou carapaças de carbonato de cálcio. Organismos que se alimentam de plantas absorvem esse carbono e o devolvem à natureza quando morrem.

Em alguns ambientes, porém, essa devolução não acontece. Às vezes, restos de organismos mortos são rapidamente cobertos por sedimentos e passam milhões de anos cozinhando lentamente no subsolo. No processo, sofrem transformações químicas que concentram o carbono em outras moléculas orgânicas (no caso do petróleo, longas cadeias de carbono e hidrogênio chamadas hidrocarbonetos; no do carvão, longas cadeias de anéis aromáticos como benzeno e naftaleno). Em alguns lugares do mundo, o plâncton morto do fundo do mar vira petróleo e gás fóssil. Em outros, plantas mortas em antigos pântanos foram soterradas em ambientes de baixo oxigênio, produzindo o carvão mineral (em algumas rochas de carvão é possível ver até mesmo impressões de folhas). Como são restos de organismos vivos muito antigos, essas substâncias são chamadas em seu conjunto de combustíveis fósseis. Quando você abastece seu carro com gasolina, está literalmente enchendo o tanque com cadáveres de microrganismos de milhões de anos de idade.

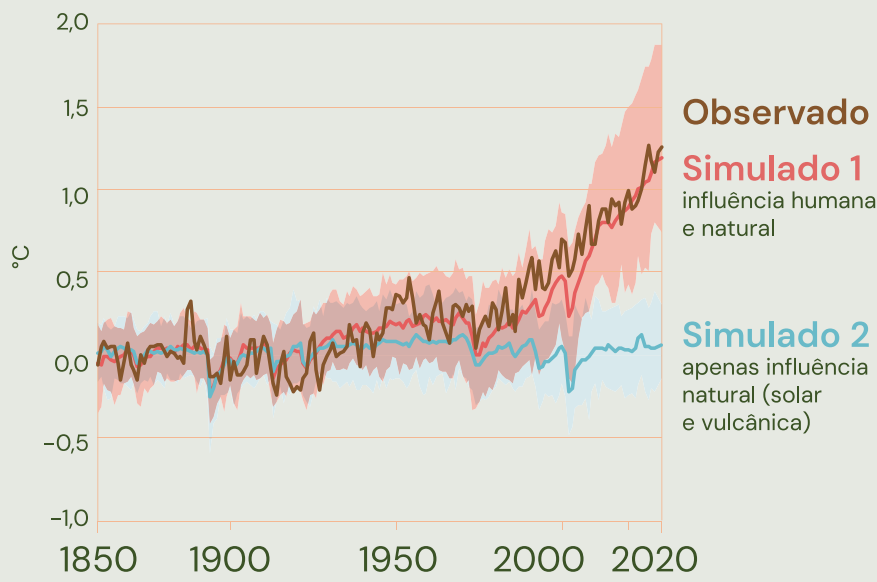
Por causa de suas características químicas, os hidrocarbonetos do petróleo e do gás e as moléculas orgânicas do carvão armazenam muita energia na forma de ligações entre os átomos. Na presença de calor e oxigênio, hidrocarbonetos são quebrados e produzem CO<sub>2</sub> e água. Essas novas ligações produzem mais energia em forma de calor do que o que foi necessário para quebrar o hidrocarboneto. É por isso que os combustíveis fósseis são tão eficientes para produzir energia, substituindo o carvão vegetal e a lenha (nos quais o carbono está menos concentrado na biomassa).

A intensa exploração dos combustíveis fósseis a partir da Revolução Industrial, no fim do século 18, vem desequilibrando o ciclo do carbono ao lançar muito mais CO<sub>2</sub> na atmosfera do que os oceanos e as florestas conseguem retirar para alimentar a fotossíntese. Pior, esse mesmo CO<sub>2</sub> em excesso, no mar, combina-se com a água para formar ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que impede a formação das carapaças de calcário de crustáceos e do plâncton. Ao acidificar o oceano, portanto, o CO<sub>2</sub> extra prejudica ainda mais a capacidade da biosfera de remover carbono do ar, agravando ainda mais a crise do clima.



# Tem culpa eu? (Spoiler: tem)

Aquecimento observado e simulado com influência humana e natural



Fonte: Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC

Pelo menos desde 2007 a ciência já afirma que o aquecimento do sistema climático é inequívoco. Mas como é possível saber que são os seres humanos seus causadores? Afinal, o clima do planeta já mudou no passado e a atuação conjunta de oceanos e atmosfera é muito complexa e variável. Será que não estamos diante de mais um ciclo natural de aquecimento?

Como num trabalho de detetive, os cientistas usam várias linhas de evidência para dar a resposta e encontrar os culpados. O jeito mais simples de fazer isso é elaborar uma previsão do passado: olhar as temperaturas já registradas desde o início das medições e tentar reproduzi-las em computador usando fatores naturais de forçamento radiativo e fatores naturais e antropogênicos — os gases de efeito estufa. Somente quando a influência humana é computada o modelo consegue reproduzir o aquecimento observado.

Também dá para encontrar a impressão digital dos humanos no clima medindo a temperatura em diferentes camadas da atmosfera com o auxílio de satélites. Se variações orbitais da Terra ou da energia enviada pelo Sol fossem culpadas pelo aquecimento atual, haveria aumento de temperatura na troposfera (camada mais baixa) e na estratosfera (camada mais alta). Só que o que os satélites vêm medindo há décadas é um aquecimento na troposfera e um resfriamento da estratosfera, que é consistente com o aprisionamento do calor irradiado pela Terra por uma capa de gases na baixa atmosfera. Todo esse conjunto de evidências aponta para a responsabilidade humana no clima. Também foi possível quantificar essa responsabilidade em graus Celsius, embora com menos certeza. Em 2021, o IPCC declarou que, do 1,09°C que o mundo já havia esquentado desde a era pré-industrial, 98% era provavelmente devido à ação humana.

Na segunda década do século 21, os cientistas também começaram a detalhar sistematicamente a parcela de culpa do aquecimento global em eventos extremos individuais, como secas, tempestades, alagamentos, ondas de calor e nevascas, entre outros. Esses eventos nem sempre são necessariamente resultado da perturbação dos sistemas climáticos gerada pela mudança do clima; podem ser simplesmente resultado da variabilidade climática natural.

A cautela para relacionar eventos extremos às mudanças climáticas fomentou o desenvolvimento de um campo específico de pesquisas e o uso de uma metodologia estatística criteriosa para publicar os chamados estudos de detecção e atribuição. Seu objetivo é compreender se e o quanto eventos extremos individuais foram tornados mais prováveis e/ou mais intensos pela influência humana no clima. Esses levantamentos podem ter diferentes abordagens, como a utilização de modelos climáticos para comparar cenários com e sem a forçante antropogênica, por exemplo. Uma referência nesse campo é a *World Weather Attribution* (WWA), uma rede de cientistas especializados em alterações do clima.



O IPCC

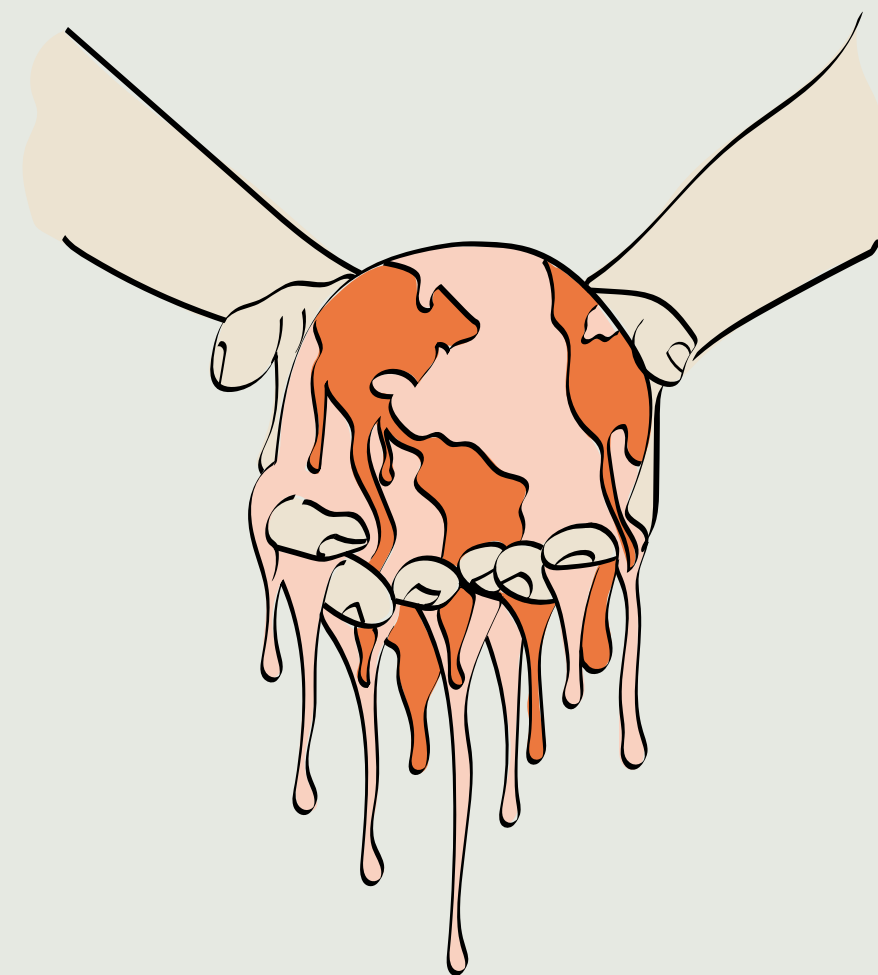


## A ciência ataca a crise do clima



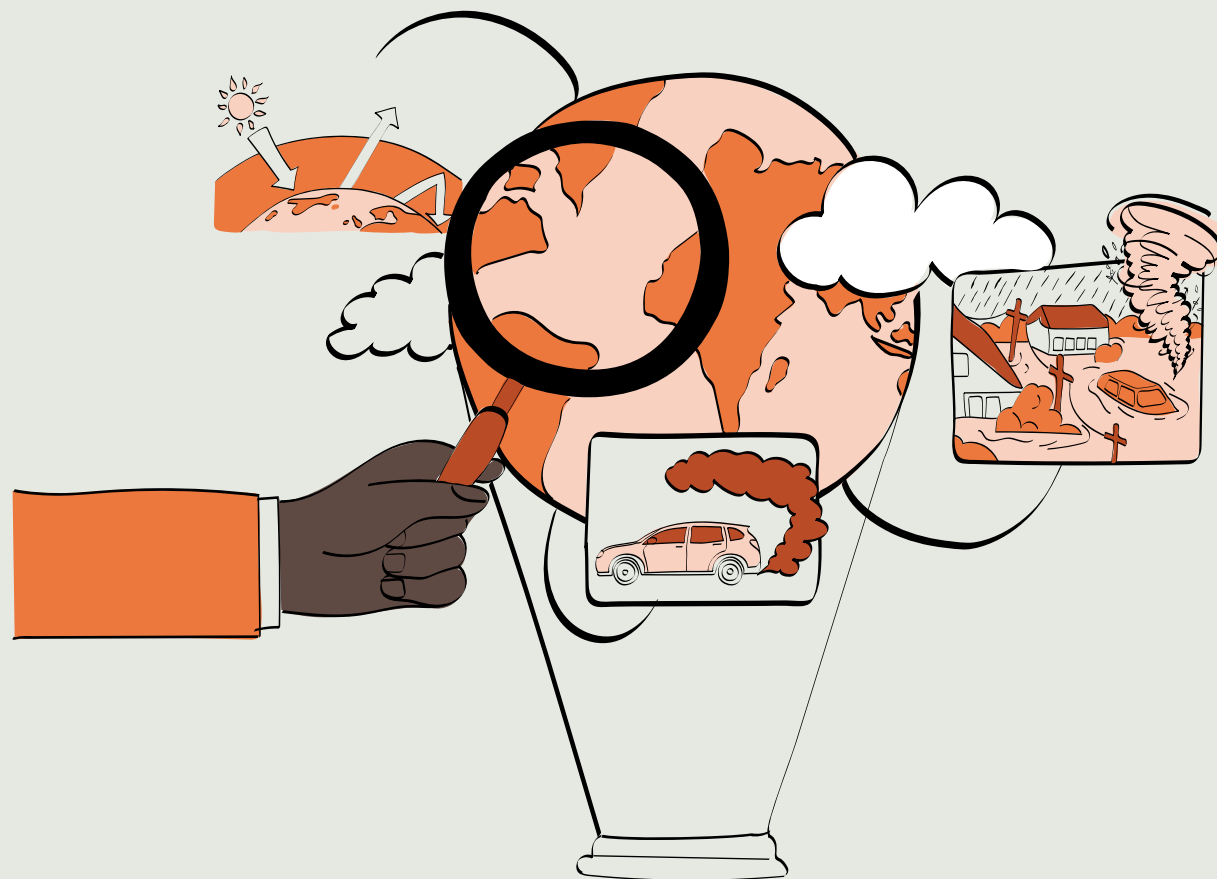
Um discurso histórico do climatologista James Hansen numa audiência pública no Senado dos Estados Unidos, em 23 de junho de 1988, foi decisivo para pôr a crise climática no radar da opinião pública. Na ocasião, Hansen, então diretor de estudos espaciais da Nasa, apresentou três principais conclusões: a Terra estava mais quente do que em qualquer outro período recente da história; esse aquecimento podia “com 99% de certeza” ser atribuído às atividades humanas que aumentaram a concentração de gases-estufa na atmosfera; e esse processo aumentaria a intensidade e a frequência de eventos extremos como ondas de calor, tempestades e secas.

Naquela mesma época, o Pnuma (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) e a OMM (Organização Meteorológica Mundial) já vinham discutindo o assunto. Dias depois do depoimento de Hansen, foi realizada em Toronto, no Canadá, a conferência *Changing Atmosphere: Implications for Global Security*, promovida pelo governo canadense com apoio das duas instituições. Tomadores de decisão, políticos, cientistas, ONGs, órgãos governamentais e integrantes do corpo da ONU aprovaram ali uma declaração afirmando a existência do aquecimento global causado por ação humana.



No mesmo ano, foi criado o IPCC, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, uma iniciativa do Pnuma e da OMM. A Assembleia Geral do órgão de 6 de dezembro de 1988 estabeleceu a primeira tarefa: preparar um panorama sobre o “estado da arte” do conhecimento científico sobre as mudanças climáticas, o impacto social e econômico do fenômeno e apontar estratégias de enfrentamento. Sinalizou-se, também, a ideia de criar uma conferência global sobre o clima. O IPCC reúne centenas de cientistas do mundo todo, trabalhando voluntariamente

divididos em três grupos de trabalho: um avalia a base física da mudança do clima; um segundo, os impactos e as vulnerabilidades de sociedades e ecossistemas; o terceiro trata da chamada mitigação, ou como reduzir as emissões de gases que causam as alterações climáticas. Esses grupos se dedicam a compilar, a cada cinco ou seis anos, todo o conjunto de evidências disponíveis na literatura científica, e a produzir grandes relatórios de avaliação com tudo o que a humanidade sabe a respeito. Esses relatórios, de mais de mil páginas cada um, são acompanhados de um sumário para tomadores de decisão, na esperança de que os políticos, uma vez informados, possam agir.



Ao todo, o IPCC já publicou seis grandes relatórios. O primeiro (chamado FAR), em 1990, forneceu a base científica para o estabelecimento da Convenção do Clima das Nações Unidas, em 1992. O segundo (SAR), em 1995, abalou o mundo ao detectar pela primeira vez “evidência discernível” do impacto humano no clima — levando à aceleração de campanhas desinformativas pela indústria fóssil. O quarto (AR4) deu ao IPCC o Prêmio Nobel da Paz de 2007.

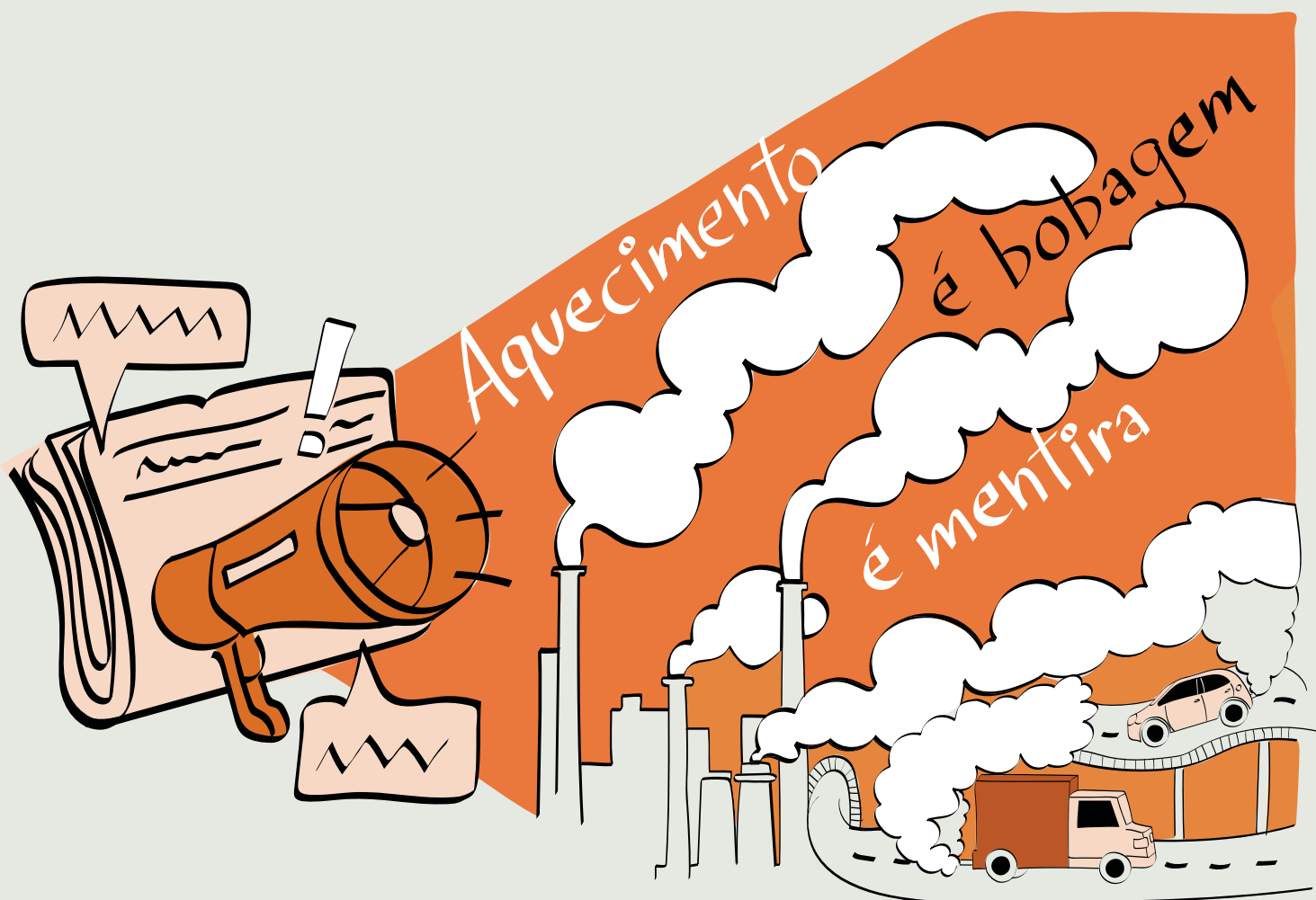
O IPCC é frequentemente acusado de alarmismo. Na verdade é o contrário: o painel é extremamente conservador, por dois motivos. Primeiro, as conclusões dos sumários executivos precisam ser aprovadas palavra por palavra por representantes de mais de 190 governos, o que inclui países petroleiros como Estados Unidos, Rússia e Arábia Saudita. Segundo, os relatórios se baseiam em ciência consolidada e frequentemente descartam estudos novos e cenários extremos. Por exemplo, em 2007 já havia evidências de que o derretimento de mantos de gelo causaria uma elevação de 1 metro ou mais no nível do mar, mas o IPCC preferiu se ater a trabalhos que mostravam uma elevação máxima de metade disso. Os dados novos só seriam publicados no relatório seguinte, em 2013, quando já eram amplamente aceitos pela comunidade científica.

O negacionismo





## A indústria fóssil aposta pesado na desinformação



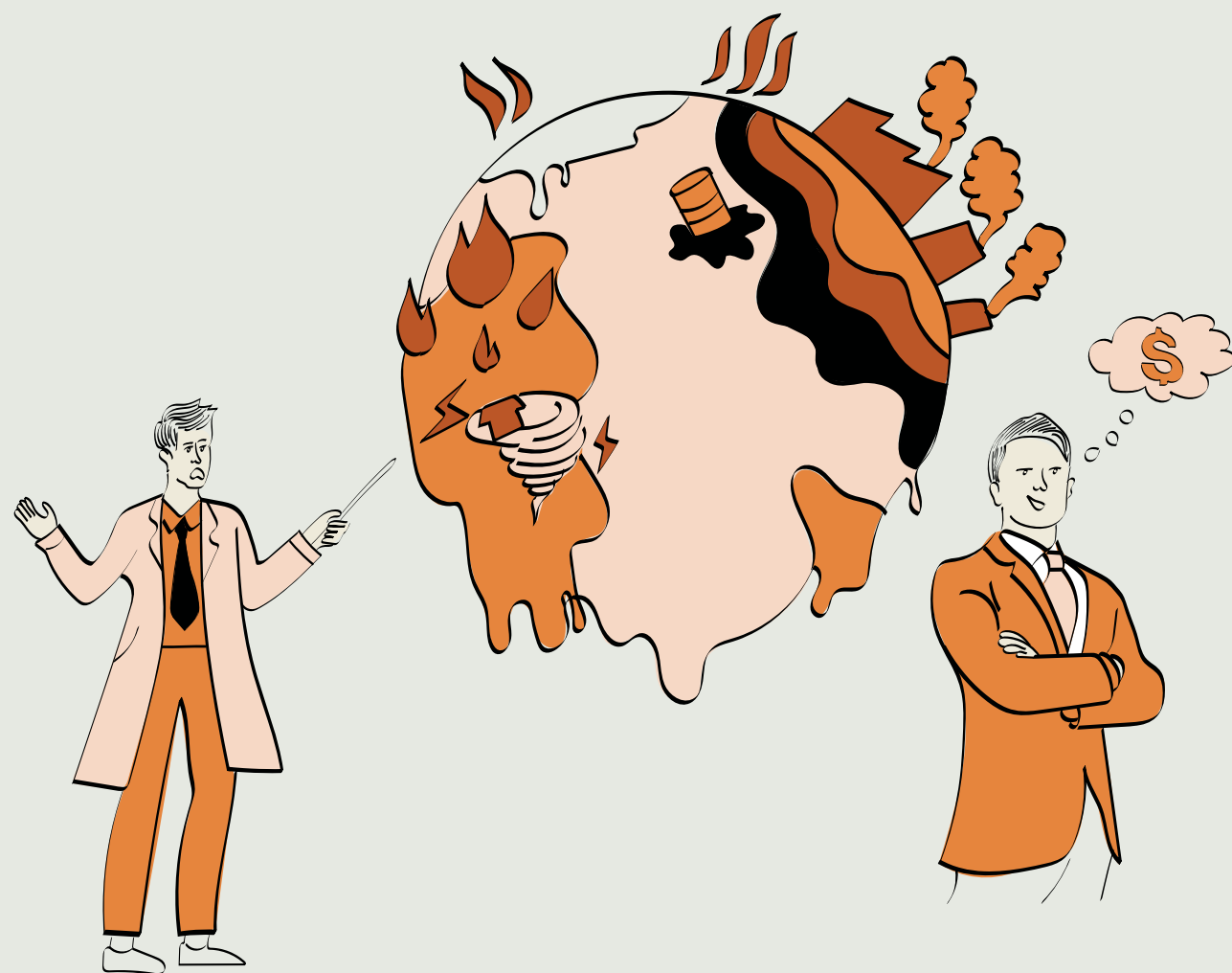
Você possivelmente já ouviu argumentos como “o clima sempre mudou”, “há dúvidas entre os cientistas” e “o clima está mais quente, mas são causas naturais” para se referir à crise climática. Essas e outras alegações, travestidas de razoabilidade científica, vêm sendo disseminadas há décadas pela indústria dos combustíveis fósseis e seus aliados para pôr em dúvida o consenso científico sobre as causas e as consequências do aquecimento global e atrasar a ação climática. Ganharam especial impulso com a disseminação de fake news nas redes sociais na última década. Mas, muito antes dos negacionistas da vacina que assombraram a internet na pandemia, já havia os negacionistas do clima.



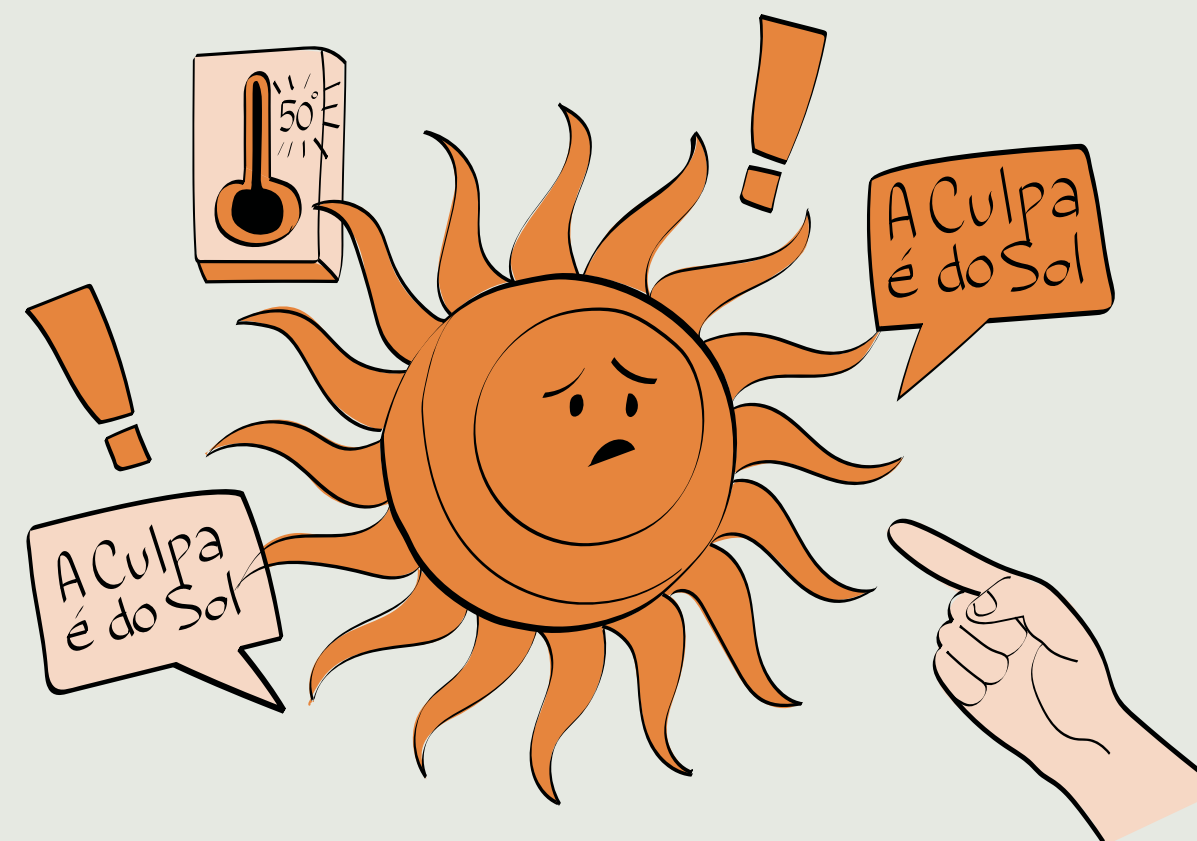
Segundo escrevem Naomi Oreskes e Eric Conway em seu livro “Mercadores da Dúvida” (2010), o negacionismo climático tem sua origem nos Estados Unidos nos anos 1970. Naquela época, think-tanks conservadores, ligados à indústria, tomaram emprestado o manual de relações-públicas desenvolvido pela indústria do tabaco nos anos 1950 para questionar consensos científicos sobre temas que exigiam regulação governamental sobre a indústria — caso da chuva ácida, do buraco na camada de ozônio e, mais tarde, do aquecimento global. “A dúvida é o nosso produto” era a máxima desse movimento: ao criar no público a impressão de que existe um debate legítimo entre cientistas sobre um determinado fato já amplamente demonstrado (a ligação entre cigarro e câncer, por exemplo), seria possível adiar medidas regulatórias sobre a indústria. A tática foi empregada com sucesso no caso da mudança climática, para azar de toda a humanidade.

Já no final dos anos 1970 havia amplo consenso entre os físicos de que os gases de efeito estufa emitidos por seres humanos poderiam produzir grandes alterações

no clima num prazo muito curto. Alguns economistas “liberais”, porém, achavam que o melhor a fazer era não agir, já que mudar o sistema energético demandaria investimentos imediatos, e no futuro a humanidade ficaria mais rica, mais tecnologicamente avançada e poderia resolver o problema. Relatórios produzidos por alguns desses think-tanks, como o Marshall Institute, o Grupo Cato e, mais tarde, o Heartland Institute, passaram a vender em Washington as conclusões dos economistas e a minimizar o consenso científico. Organizações de lobby fóssil se aliaram aos ditos “céticos” e passaram a bancá-los. A Casa Branca obviamente preferiu ouvir a mensagem de “não se preocupe” do que “o fim do mundo está próximo”.



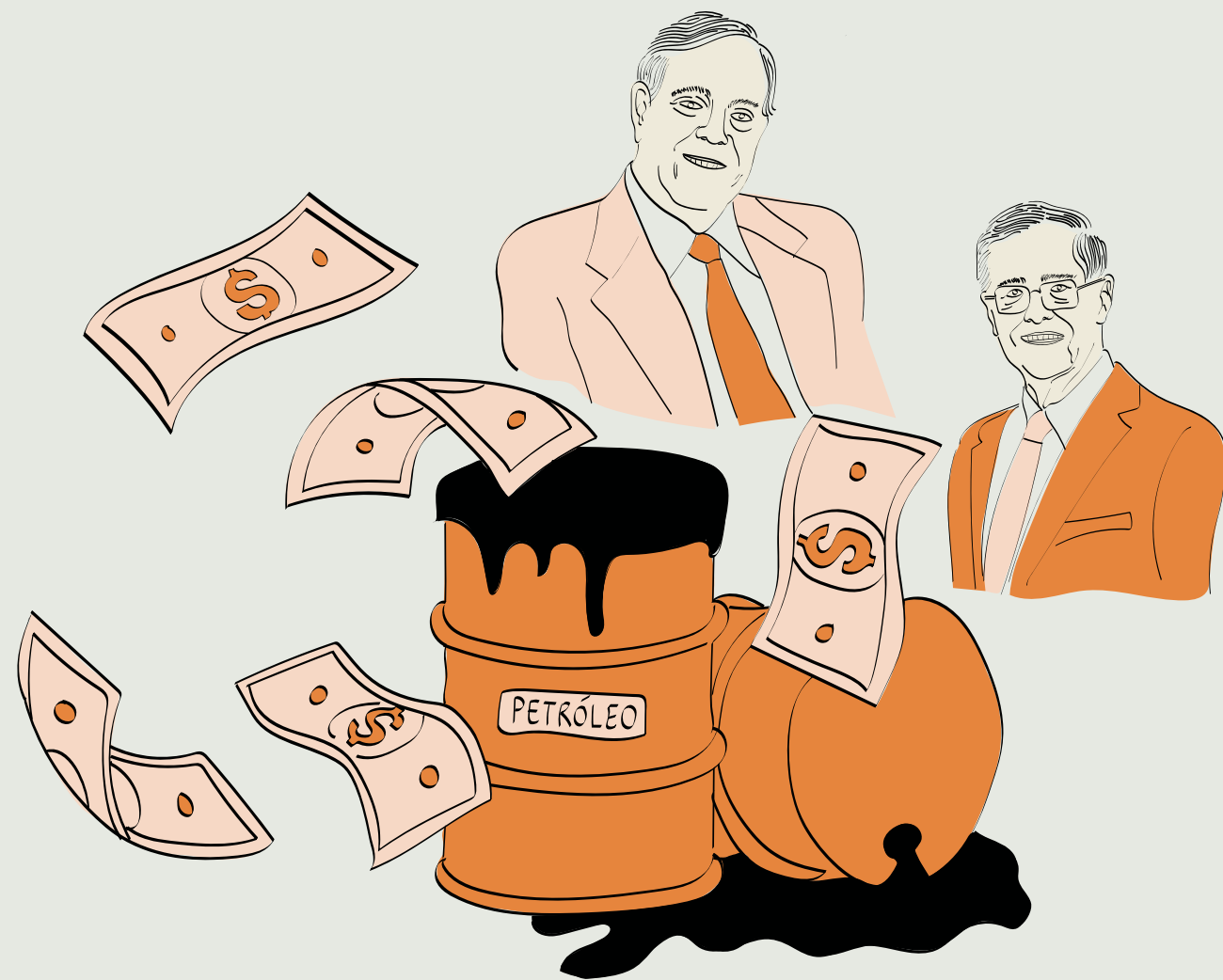
No final dos anos 1980, quando Washington poderia ter começado a regular as emissões na esteira do surgimento do IPCC e dos preparativos para a Rio-92, os negacionistas conseguiram semear a dúvida no mundo político mais uma vez, culpando o Sol pelo aquecimento global (e usando para isso dados delibera-



mente distorcidos). Em 1995, às vésperas do lançamento do relatório de avaliação do IPCC que demonstrava pela primeira vez a influência humana no clima, os negacionistas iniciaram uma campanha difamatória contra o painel e seus cientistas, que foram acusados de alterar documentos técnicos em prol de uma agenda política (que eles não diziam qual era). Àquela altura já haviam conseguido apoio de países petroleiros como Arábia Saudita e Kuwait. O mesmíssimo método seria aplicado décadas depois, em 2009, às vésperas da conferência de Copenhague, para difamar pesquisadores do IPCC após um vazamento de e-mails conhecido como “*Climagate*”.

Oreskes e Conway argumentam que a investida negacionista conseguiu capturar a própria imprensa americana, que passou a ver a mudança climática como um tema “controverso” a exigir “dois lados” na apuração de reportagens. Com a dúvida implantada na mente do público, o Senado americano não teve pudores em aprovar em 1997, por 95 votos a zero, uma resolução para impedir o país de

aderir ao Protocolo de Kyoto, acordo climático que seria negociado naquele ano. O financiamento aos negacionistas continuou: uma investigação do Greenpeace mostrou que, apenas de 1997 a 2018, uma única família de magnatas do petróleo, os irmãos Charles e David Koch, despejou US\$ 145 milhões em dezenas de think-tanks negacionistas. “Cientificamente, o aquecimento global era um fato estabelecido; politicamente, o aquecimento global estava morto”, afirmam os autores.

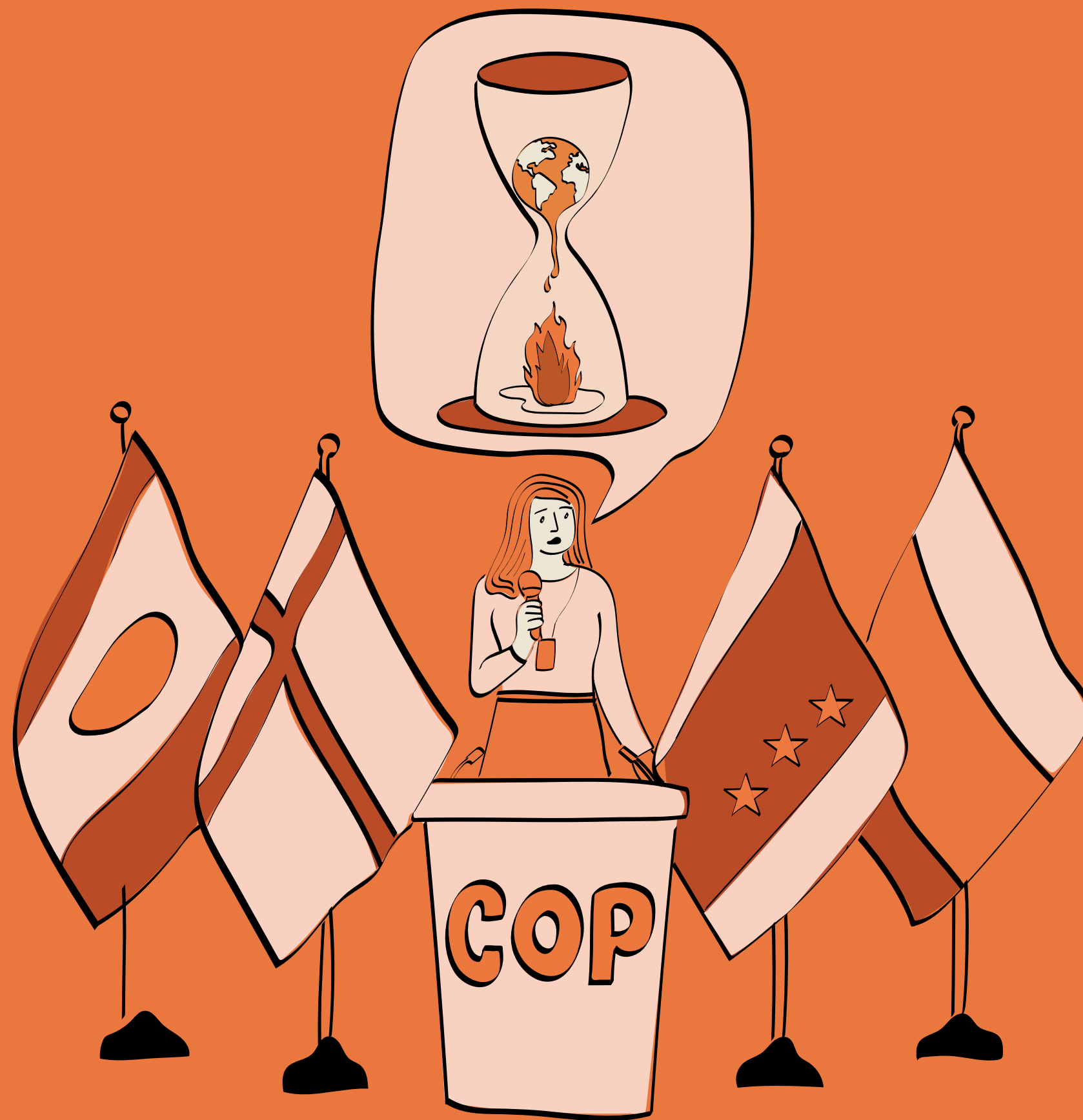


## ELAS SABIAM

Muito antes da criação do IPCC e da disseminação da noção de aquecimento global, as empresas de combustíveis fósseis já tinham evidências sólidas de que suas atividades eram capazes de alterar o clima da Terra. No entanto, ao invés de investir em alternativas para barrar as mudanças climáticas, financiaram campanhas de desinformação milionárias para dizer que o aquecimento anormal do planeta era papo furado.

Um estudo publicado em 2023 na revista científica *Science* mostrou que a maior associação comercial da indústria de petróleo e gás dos Estados Unidos sabia, pelo menos desde a década de 1950, que os combustíveis fósseis aqueciam a terra. Os barões do carvão tinham as mesmas informações em 1960. Na década seguinte, físicos e geocientistas de primeira linha contratados pela francesa Total Energy e a americana Exxon, atual ExxonMobil, disseram a mesma coisa. Nos anos 1980, foi a vez dos analistas da britânico-holandesa Shell. Esses cientistas foram obrigados a manter suas descobertas sob sigilo. Foi somente em 2015 que o segredo das petroleiras veio à tona por meio de investigações jornalísticas que puseram a Exxon no banco dos réus nos EUA.

# A convenção do clima





## Uma resposta global para um problema global

A comoção criada na opinião pública em torno da ideia da mudança do clima provocada por humanos no final da década de 1980, a descoberta do buraco na camada de ozônio, a criação do conceito de desenvolvimento sustentável, em 1987, e o primeiro relatório do IPCC, em 1990, levaram a ONU a propor a criação de uma convenção internacional sobre as alterações climáticas. Em 1992, durante a Rio-92, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, foi adotada a UNFCCC (sigla em inglês para Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima). A solução multilateral, onde cada país tem voz e voto, parecia a mais democrática para lidar com um problema que é global por excelência.

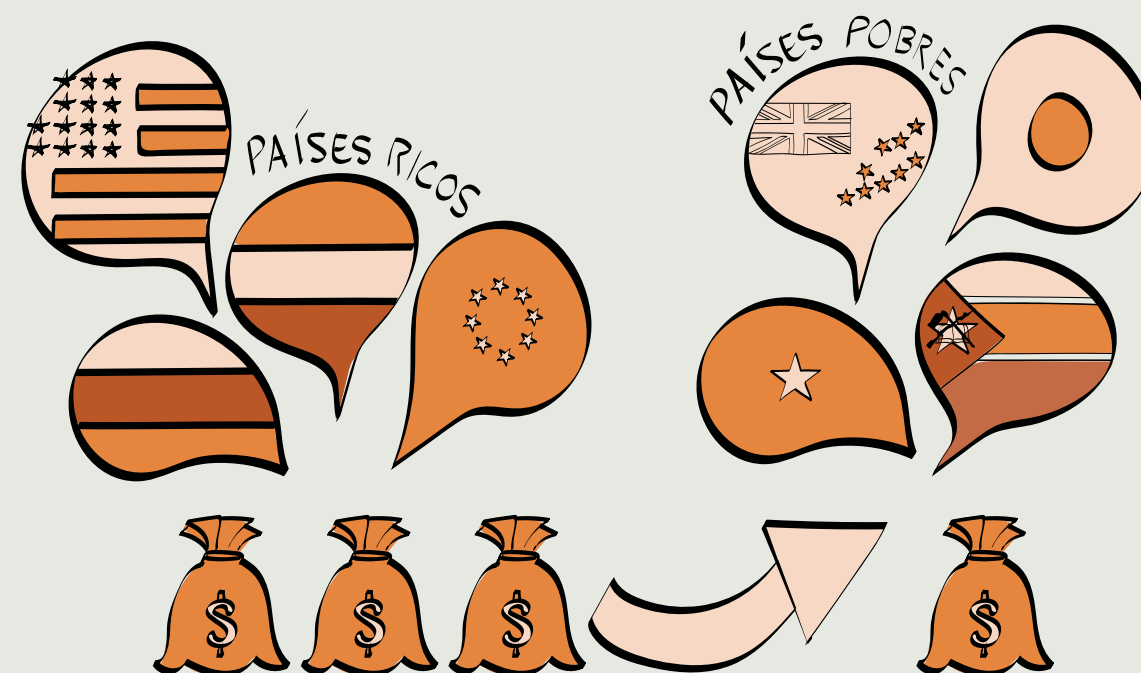
Em seu artigo segundo, a convenção estabelecia:

“O objetivo final desta Convenção e de quaisquer instrumentos jurídicos com ela relacionados que adote a Conferência das Partes é o de alcançar, em conformidade com as disposições pertinentes desta Convenção, a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima, que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável.”

A UNFCCC tem alguns princípios de funcionamento que até hoje influenciam as negociações internacionais sobre o combate à mudança climática. O mais importante deles é o das chamadas responsabilidades comuns, mas diferenciadas e respectivas capacidades (CBDR-RC). Segundo esse princípio, os países que mais fizeram para causar a crise do clima, os industrializados, devem fazer mais para resolvê-la, seja adotando medidas mais estritas de corte de emissões, seja finan-



ciando a mitigação e a adaptação nos países mais pobres. A diferenciação entre as nações também é um princípio fundamental: na convenção, os países foram divididos em Anexo 1 (industrializados mais as chamadas “economias de transição”, o ex-bloco socialista) e não-Anexo 1 (o resto).





A fim de implementar o objetivo da UNFCCC de impedir a humanidade de destruir o clima da Terra, os países-membros da convenção (hoje 197 mais a União Europeia) passaram a se reunir anualmente a partir de 1994, quando o tratado entrou em vigor. A primeira Conferência das Partes, ou COP, aconteceu em Berlim em 1995 e foi presidida pela então futura chanceler alemã Angela Merkel.



06b

## Pioneirismo em Kyoto

Na COP3, em Kyoto, Japão, foi adotado o primeiro instrumento legal para tentar cumprir a UNFCCC. O chamado Protocolo de Kyoto previa que os países do Anexo 1 cortassem suas emissões em 5,2% em relação a 1990 até 2012. Os países em desenvolvimento não tinham obrigações, mas poderiam participar do esforço global vendendo créditos de carbono — derivados da implementação de projetos de energia chamadas de limpa ou reflorestamento — às nações com metas a cum-

prir, por meio do chamado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Países ricos também poderiam comercializar direitos de poluir entre si, o que deu origem ao primeiro mercado de carbono do mundo, na União Europeia.



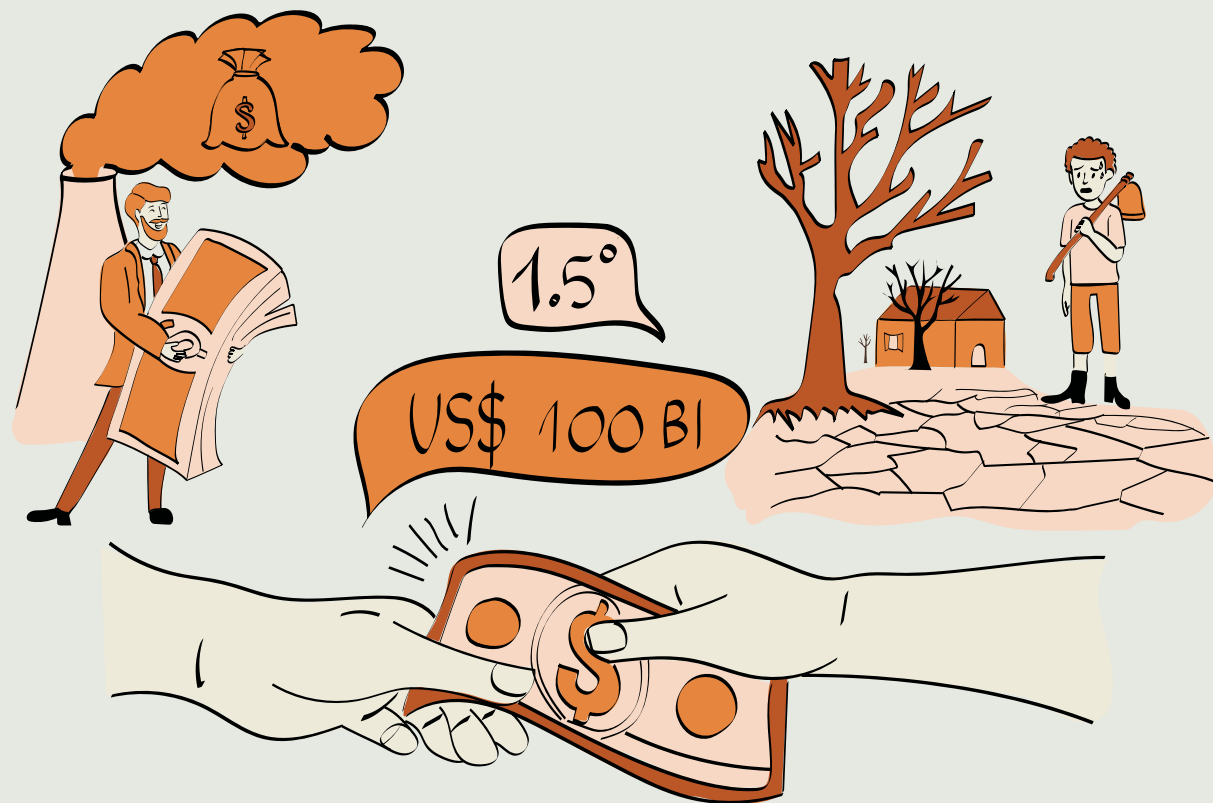
Em 2001, os EUA, que emitiam quase 40% do carbono do mundo industrializado, se retiraram do Protocolo de Kyoto, retardando sua ratificação e tornando-o essencialmente inútil para combater o aquecimento da Terra. Austrália e Canadá seguiram os EUA posteriormente. O tratado só entraria em vigor em 2005, com a ratificação russa. Mas seria preciso negociar uma extensão de Kyoto para entrar em vigor após 2012, ou um novo acordo, que envolvesse os EUA e os países em desenvolvimento, que no começo dos anos 2000 ultrapassaram as nações ricas como maiores emissores do planeta.

## Copenhague: crônica de um fracasso

A COP15, marcada para 2009 em Copenhague, Dinamarca, tinha uma missão enorme para cumprir: fechar um acordo para além da vigência do Protocolo de Kyoto que envolvesse os EUA e os países em desenvolvimento. Havia otimismo no ar com a chegada de Barack Obama à Casa Branca, com a forte disseminação das energias renováveis e com o clima ocupando as discussões públicas e as manchetes dos jornais. Seria o maior encontro de chefes de Estado e governo da história.

Com tudo isso, porém, a cúpula foi um fracasso. Este já vinha anunciado desde as semanas anteriores à COP, quando Obama reuniu-se com o presidente chinês, Hu Jintao, em Cingapura, para fechar o entendimento que selaria o destino da cúpula: EUA e China não estavam preparados para um acordo legalmente vinculante como Kyoto. Propunham um acordo “politicamente vinculante”, algo a que a Europa resistia. Cada país diria à ONU, de forma voluntária, o que pretendia fazer para cortar emissões.

Erros da presidência dinamarquesa terminaram de fazer o caldo entornar, revolvendo os países em desenvolvimento. No final da COP, sobrou para os presidentes e premiês de Brasil, França, Índia, EUA, China, Alemanha e África do Sul negociar uma declaração política chamada Acordo de Copenhague, que nem sequer pôde ser formalmente adotada no final da COP por oposição da Venezuela. Para não dizer que Copenhague foi um fiasco total, dois números fundamentais para o mundo apareceram pela primeira vez na COP15: os US\$ 100 bilhões por ano que os países ricos prometeram levantar para os pobres a partir de 2015 (uma bravata improvisada de Hillary Clinton) e o 1,5°C de estabilização do aquecimento global que as nações insulares queriam (e conseguiram anos depois) transformar em meta global.



# O Acordo de Paris



07a

## A última chance da humanidade

Em 2015, um alinhamento incomum de astros entre Estados Unidos e China permitiu que o mundo produzisse o primeiro acordo realmente universal contra a crise do clima. Em 12 de dezembro daquele ano, foi adotado em Le Bourget, nos arredores de Paris, na COP21, um pacto pelo qual todos os países, ricos e pobres, deveriam ter metas de corte de emissões de gases de efeito estufa. As metas, chamadas NDCs (Contribuições Nacionalmente Determinadas), eram de proposição voluntária, mas de execução obrigatória. Esse formato híbrido foi o único jeito de permitir que os EUA estivessem a bordo, já que o Senado americano jamais ratificaria um acordo internacional desse tipo.

O Acordo de Paris tem três grandes objetivos:

Limitar o aquecimento da Terra bem abaixo de 2°C, fazendo esforço para limitá-lo a 1,5°C;

Aumentar a capacidade da humanidade de se adaptar aos impactos da mudança do clima;

Alinhar os fluxos financeiros globais com uma economia de baixas emissões e alta resiliência.





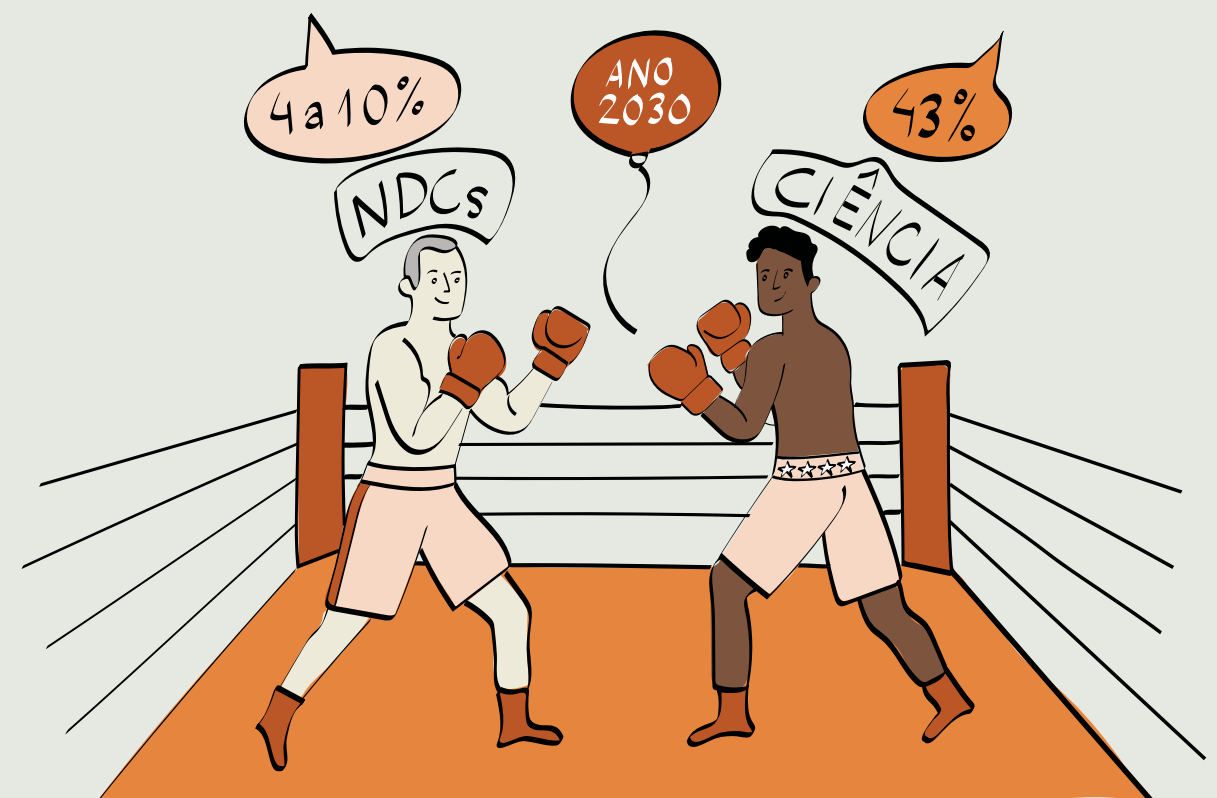
Para isso, introduz algumas inovações em sua arquitetura. Além de obrigar todos os países a ter algum tipo de meta (embora estas sejam mais frouxas para os países em desenvolvimento), Paris tem um mecanismo de revisão quinquenal da ambição conjunta, o que dispensa ficar renegociando o tratado de tempos em tempos. E também prevê o próprio fim, ao instar todos os países do mundo a apresentar estratégias de longo prazo para descarbonizar suas economias até o meio do século, equilibrando emissões com remoções de gases de efeito estufa (o chamado “net zero”, ou emissão líquida zero). Outra novidade foi a criação do primeiro mercado de carbono global, desenhado em seu artigo 6º e só regulamentado em 2024, na COP29.



O Acordo de Paris foi o tratado ambiental mais rapidamente ratificado da história: entrou em vigor em 2016, menos de um ano após sua assinatura. Ele passou por uma grande fase regulatória, na qual seu “livro de regras” foi desenhado e negociado. Mas enfrenta dois desafios imensos para sua implementação. O primeiro é o caráter voluntário das metas: em seu conjunto, as NDCs propostas reduziriam as emissões globais em 2030 em cerca de 4% – quando a ciência diz que elas precisam cair 43%. O aquecimento global implicado nesse nível de ambição é de quase 3°C, o dobro do necessário.

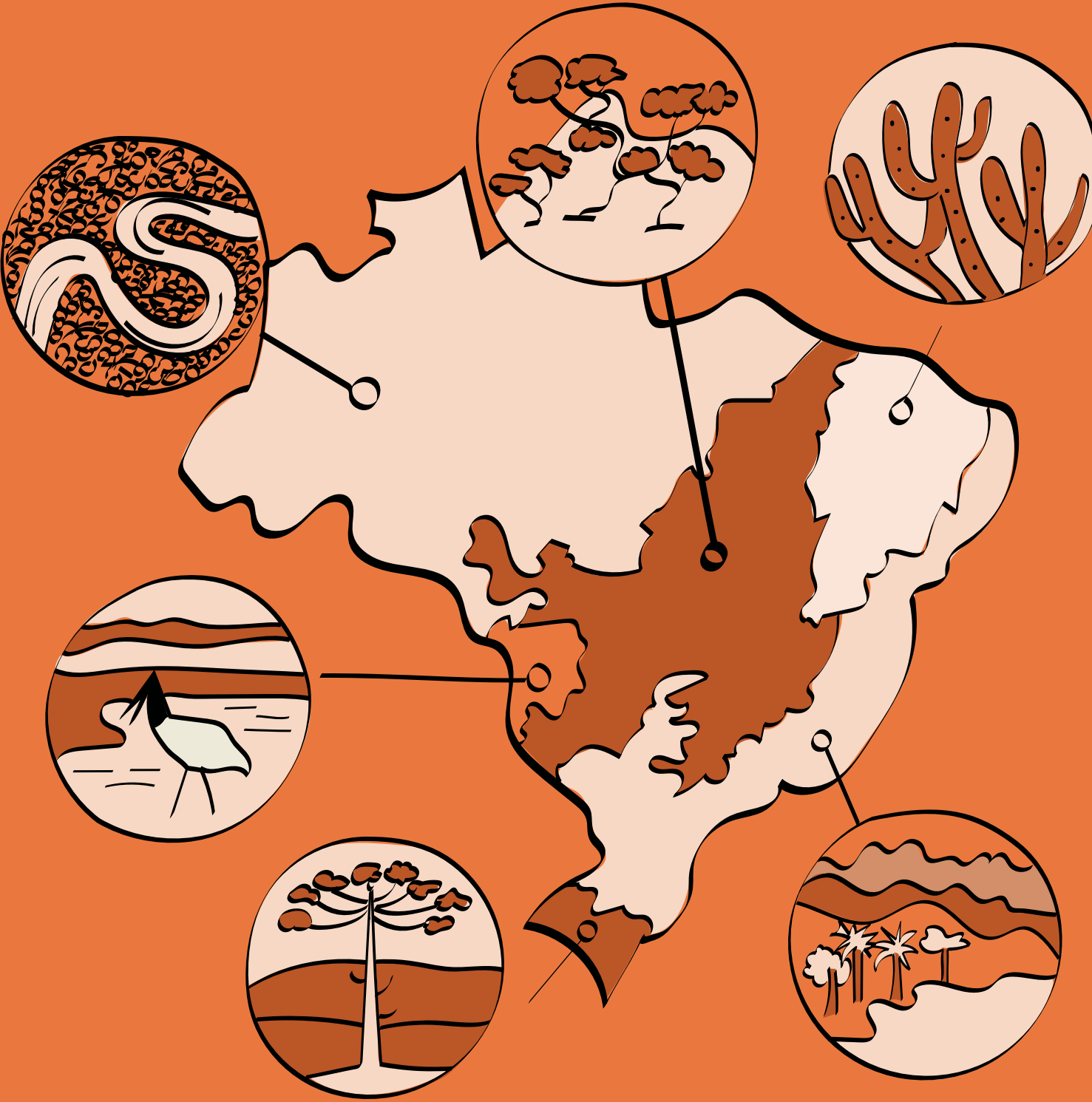
O segundo está no fato de que os países em desenvolvimento exigem dos ricos financiamento para cumprir suas metas. A necessidade para cumprir as NDCs foi estimada em pelo menos US\$ 1 trilhão por ano pela própria UNFCCC, e não há nada sequer perto desse montante sobre a mesa (ao contrário, como se viu na COP29, no Azerbaijão, os países ricos resistem a pagar e ainda querem empurrar parte da conta para a China e os países árabes).

De qualquer forma, em Paris foi dada a largada para uma reorientação completa da economia mundial e para o abandono dos combustíveis fósseis.





# O Brasil

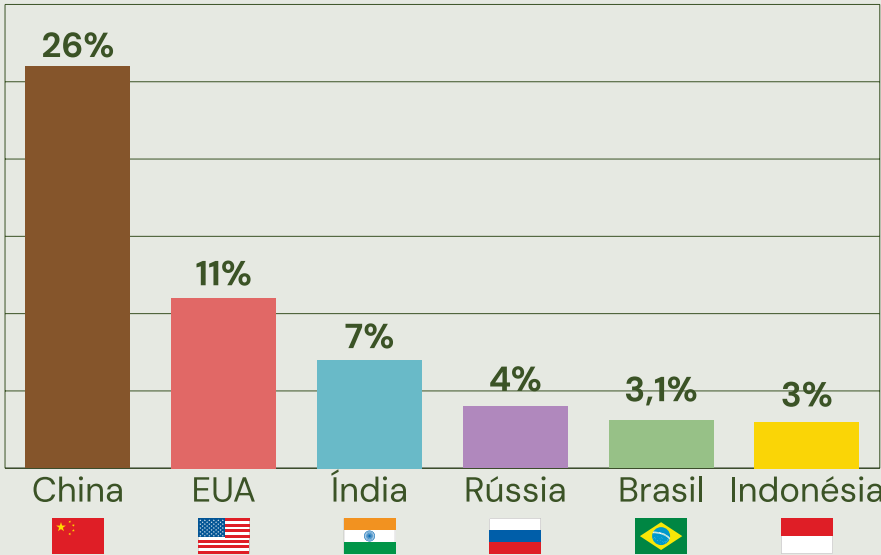




# O status do país

O Brasil é um dos maiores poluidores climáticos do planeta e, por isso, tem grande responsabilidade no combate à crise do clima. Segundo os mais recentes dados do Cait/WRI, referentes ao ano de 2021, o país é o quinto maior emissor global de gases de efeito estufa, com 3,1% do total mundial.

Maiores emissores de gases de efeito estufa em 2021

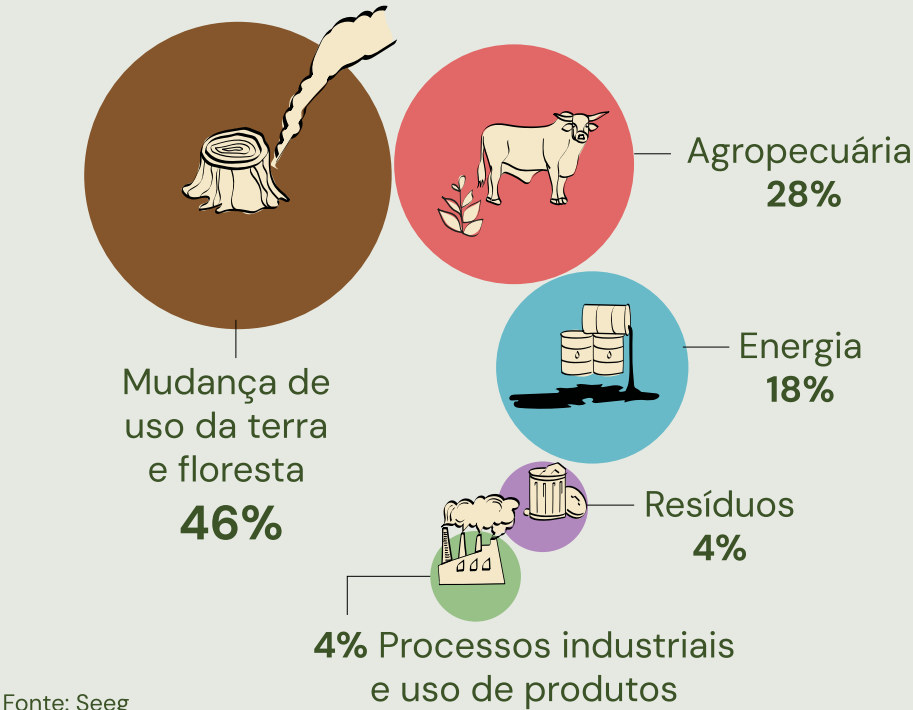


Fonte: Cait/WRI

Os dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG) mostram que, em 2023, seguindo o padrão histórico do país, as mudanças no uso da terra e a agropecuária foram as principais causadoras das emissões brasileiras e representaram mais de 70% da poluição climática do país.

As mudanças de uso da terra foram responsáveis pela maior parte das emissões, registrando 46% do total (com 1,062 gigatoneladas de CO<sub>2</sub>e despejados na atmosfera). A agropecuária veio na sequência, com 631 MtCO<sub>2</sub>e (28%). Ainda assim, o papel dos combustíveis fósseis no perfil de emissões brasileiras não pode ser desconsiderado: as emissões do setor de energia são uma fatia importante, com 18% do total em 2023, aparecendo em terceiro lugar no ranking de emissões por setor.

Participação dos setores no perfil das emissões brasileiras em 2023



Fonte: Seeg

Os números de 2023 apontam que, mesmo com queda significativa (de 24%) das emissões por desmatamento, puxada pela retomada de políticas públicas para redução da derrubada na Amazônia, 74% de toda a poluição climática brasileira vieram da soma de mudança no uso da terra (principalmente do desmatamento em todos os biomas brasileiros) e o setor agropecuário propriamente.

Apesar de os setores serem contabilizados separadamente, é importante notar que o modelo dominante da agropecuária brasileira está diretamente relacionado ao desmatamento: como mostra o Relatório do Desmatamento de 2023, do Mapbio-

mas, 97% de toda a derrubada de vegetação nativa ocorrida no Brasil em cinco anos teve como vetor a pressão agropecuária. A expansão da fronteira agrícola converte vegetação nativa principalmente em pasto (para rebanhos) e em monoculturas extensivas.

Já as emissões da agropecuária são provenientes do chamado “arroto do boi” (o resultado da fermentação entérica do rebanho bovino) e também do tratamento e da disposição que os dejetos desses animais recebem, do cultivo de arroz irrigado, da queima dos resíduos agrícolas do cultivo de cana-de-açúcar e algodão e do manejo dos solos agrícolas, incluindo o uso de insumos para incremento de nitrogênio.

Uma outra pesquisa do SEEG apontou que os sistemas alimentares no Brasil emitiram 1,8 bilhão de toneladas de gases de efeito estufa em 2021. A cifra representa 73,7% do total emitido pelo país naquele ano. O levantamento — que aborda transversalmente todas as emissões do conjunto dos sistemas alimentares no Brasil — contabiliza o despejo de CO<sub>2</sub> resultante da conversão de vegetação em lavouras e pastos, as emissões agropecuárias diretas (incluindo a digestão de ruminantes), as resultantes da queima de combustíveis fósseis por máquinas agrícolas e transporte da produção e do uso de energia na agroindústria, além das emissões provenientes de resíduos sólidos e líquidos de todos esses processos.

Somente a cadeia de produção de carne bovina emite 1,4 bilhão de toneladas brutas de gases de efeito estufa. Sozinha, a produção de carne brasileira seria o sétimo maior emissor do planeta.

Já o setor de energia, que concentrou 18% das emissões brasileiras em 2023 (ou 414 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e, mais que o total de emissões anuais do Reino Unido, de 411 milhões), merece atenção dupla: além da fatia de poluição climática que representa no país, o setor é responsável também por (literalmente) abastecer emissões de outros países, com o petróleo e outros combustíveis fósseis produzidos no Brasil e queimados no exterior.

Os combustíveis de fontes fósseis exportados não entram na conta de emissões brasileiras, mas aquecem o planeta do mesmo jeito. Atualmente, o Brasil está entre os 10 maiores produtores de petróleo do mundo, e tem o objetivo declarado de tornar-se o quarto maior.



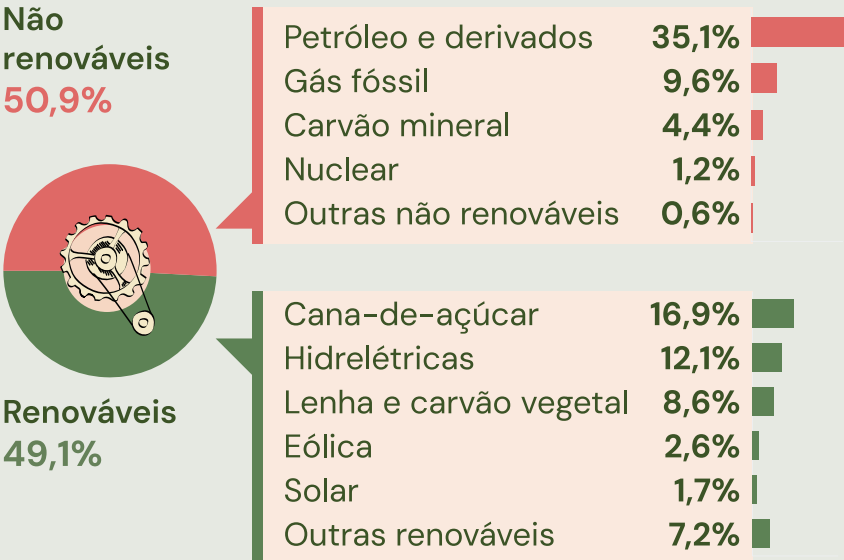
Na conta das emissões do setor de energia no Brasil, entram aquelas provenientes da queima de combustíveis em atividades que precisam de força motriz ou calor, como o transporte, a indústria e a geração de eletricidade. São calculados, por exemplo, tanto os gases emitidos pela queima de gasolina em um motor que movimenta um carro quanto os emitidos pela queima de gás fóssil para aquecer uma caldeira industrial.

Além das emissões resultantes da queima de combustíveis, o setor de energia concentra ainda as chamadas emissões fugitivas — escapes (intencionais ou não) de gases durante a exploração —, o transporte ou a produção de combustíveis. O vazamento de metano (CH<sub>4</sub>) em poços de exploração de petróleo é um exemplo de emissão fugitiva.

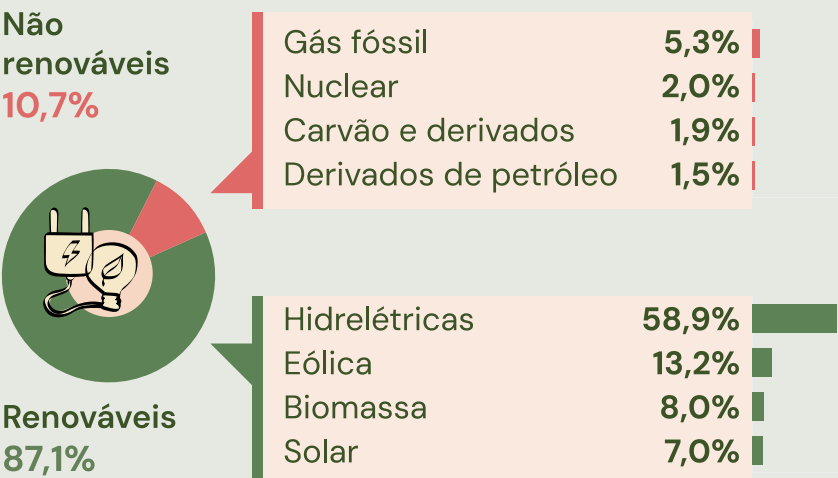
Como apontou o estudo *Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil*, o país tem potencial para chegar a 2050 emitindo cerca de 102 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) no setor de energia, quase 80% a menos do que é emitido atualmente. E isso sem recorrer a soluções sem comprovação científica em escala, como captura e armazenamento de carbono (CCS), e sem a necessidade de expandir a produção de combustíveis fósseis.

Mas, caso as tendências atuais para o setor de energia se mantenham — mesmo incluindo compromissos positivos relacionados à produção de biocombustíveis e ao aumento de fontes renováveis —, o setor de energia brasileiro deverá chegar a 2050 emitindo 558 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>e, número superior ao pico alcançado em meados da década passada.

### Matriz energética do Brasil em 2023



### Matriz elétrica do Brasil em 2023



Observação: Considerando a eletricidade importada da hidrelétrica Itaipu, a participação das fontes renováveis na matriz elétrica aumenta para 89,2%.  
Fonte: Balanço energético Nacional da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética

## METANO, O VILÃO ESQUECIDO

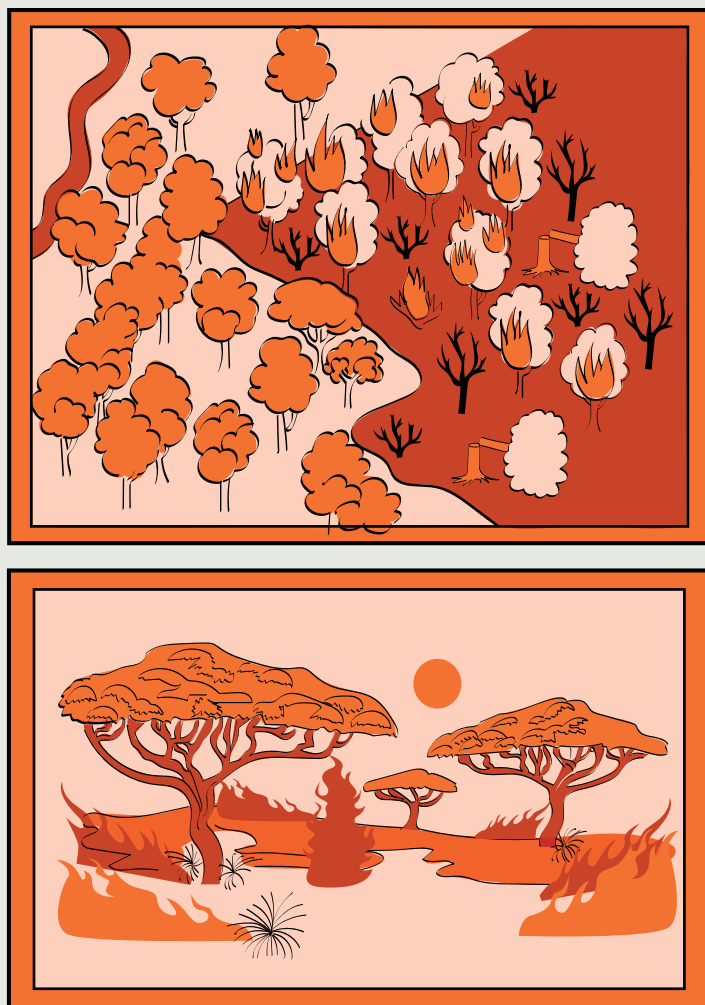
Apesar de frequentemente secundarizado quando se fala em poluição climática, o metano (CH<sub>4</sub>) é um gás de efeito estufa que merece atenção especial, principalmente no Brasil. O país é o quinto maior emissor de metano do mundo, representando atualmente cerca de 5% das emissões globais do gás resultantes de atividades humanas. Quase um terço do total de emissões brasileiras vem do metano, proveniente principalmente da agropecuária (responsável por mais de 70% das emissões brasileiras de CH<sub>4</sub>) e do setor de resíduos (que emite mais de 15% do metano no país). Além disso, queimadas de vegetação e a queima de lenha (principalmente para o cozimento de alimentos em residências, um resultado da falta de acesso a fontes energéticas modernas e sustentáveis) são fontes emissoras do gás no Brasil.

A exploração e produção de petróleo e gás natural representam uma pequena parte das emissões de metano no Brasil (diferentemente do cenário global, que tem a atividade como maior fonte emissora do gás). Concentradas em refinarias e plataformas de petróleo, essas emissões precisam ser controladas pela indústria, que deve dispor de tecnologias voltadas para a mitigação. Na agropecuária, a reversão do modelo pautado na pecuária e agricultura extensivas, com atenção aos modelos agroflorestais e de integração lavoura-floresta-pecuária, são um caminho importante de mitigação, além de outras iniciativas como a diminuição da idade de abate dos animais. Já as emissões do setor de resíduos podem ser mitigadas por meio de boas práticas como a compostagem, a erradicação de lixões e a recuperação ou queima do biogás gerado nos aterros sanitários.

Olhar para o metano é fundamental não apenas para identificar as fontes de emissão, mas também para pensar nas estratégias de enfrentamento à crise do clima. O CH<sub>4</sub> é o segundo maior responsável pelo aquecimento global (fica atrás apenas do CO<sub>2</sub>) e é um poderoso gás de efeito estufa. Cada tonelada de metano tem um potencial de aquecimento do planeta 28 vezes maior que uma tonelada de CO<sub>2</sub>. No entanto, o tempo de vida do metano na atmosfera é de aproximadamente 12 anos, contra milhares de anos do CO<sub>2</sub>. Por essas características, que fazem o metano ser chamado de um gás de “vida curta”, a ciência aponta que reduzir suas emissões é uma estratégia indispensável para controlar o ritmo das mudanças climáticas no curto prazo.

## A crise hoje

Basta viver no Brasil para perceber que a crise climática já nos afeta cotidianamente, com ondas de calor mais intensas e frequentes (como ocorreu em 2023 e 2024), secas históricas (Amazônia em 2023), chuvas e enchentes colossais (Rio Grande do Sul em 2024) e outros eventos extremos que desalojam centenas de milhares de pessoas (principalmente entre a população pobre e negra) e provocam perdas econômicas significativas, como na agricultura, afetada por quebras de safra causadas pelo clima instável em 2024. Em todos os casos, os efeitos da crise do clima atingem de maneira desproporcional a população em vulnerabilidade, se tornando um vetor de aprofundamento das desigualdades.

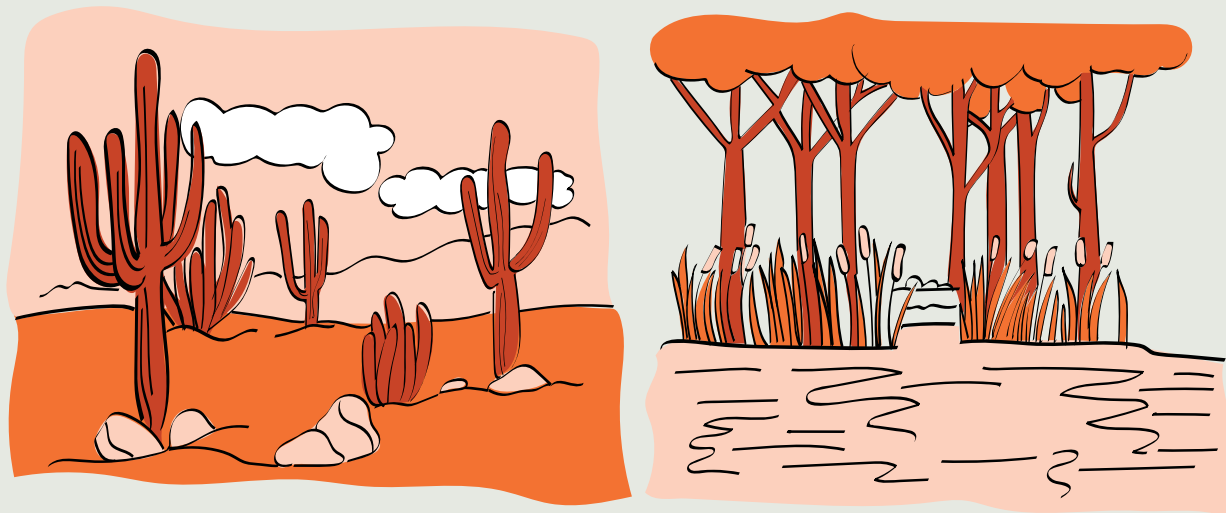


Em 2024, um estudo do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) mostrou que, com o aumento da evaporação associada ao aquecimento global, todo o Brasil está secando. O levantamento indicou que, nos últimos 30 anos, ocorreu expansão das áreas de semiárido em todo o país a uma taxa média superior a 750 mil hectares por ano, exceto na região Sul. Na região Nordeste (onde está praticamente a metade da agricultura familiar brasileira, responsável pela maior parte da produção dos alimentos que chegam à mesa dos brasileiros), a situação é mais crítica: já foram identificados mais de 6 mil hectares de áreas definidas como áridas, abrangendo ao menos seis municípios no norte da Bahia.

De maneira geral, os modelos climáticos convergem ao apontar que a crise do clima produz um cenário de chuvas mais intensas e concentradas no Sul e Sudeste do Brasil e secas mais longas e intensas no Norte e Nordeste. Em 2015, um estudo produzido pelo próprio governo federal já afirmava que o sul da América do Sul, em especial a bacia do Prata, poderia ter chuvas mais intensas e por mais tempo, conforme o aquecimento global piorasse.







O estudo é o “*Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima*”, que aplicou três modelos climáticos globais, regionalizados pelo Inpe para o país, num esforço inédito. Todos os modelos mostram um aumento da temperatura no país até o meio do século, que poderia chegar a 8°C no pior cenário. Todos eles também indicaram um aumento da precipitação, tanto em volume quanto em duração, na região Sul, além de uma redução na média da vazão de rios no Norte.

A situação é particularmente preocupante na Amazônia, onde a combinação entre efeitos das mudanças climáticas e desmatamento já faz com que o bioma emita mais gases de efeito estufa do que absorva, como apontou artigo publicado em 2021 na *Nature* pela equipe liderada por Luciana Gatti, pesquisadora do Inpe. A análise mostrou que entre 2010 e 2018 as altas taxas de desmatamento no leste amazônico foram responsáveis pelo desequilíbrio entre emissão e absorção de carbono. Àquela altura, no entanto, o lado oeste do bioma, mais preservado, ainda conseguia promover alguma compensação na absorção de CO<sub>2</sub>.

No ano seguinte, em novo artigo, Gatti e colegas soaram mais um alarme: em 2019 e 2020, com a expansão do desmate no oeste amazônico, a área também passou a emitir mais do que absorver. A pesquisa também avaliou chuvas e temperaturas. Os dados mostraram que, no acumulado de 2020, a Amazônia perdeu 12% das chuvas. Na estação chuvosa, nos meses de janeiro, fevereiro e março, a redução de chuvas foi ainda maior, chegando a 26% — quando as temperaturas subiram 0,6°C. Todos os dados se referem às comparações com a média anual do período de 2010 a 2018, analisados no estudo anterior.

O chamado “ponto de virada” da Amazônia é teorizado desde o final dos anos 1980. Estudos pioneiros do brasileiro Carlos Nobre, do indiano Jagdish Shukla e do inglês Pier Sellers mostraram que o desmatamento descontrolado poderia retirar chuvas da Amazônia a ponto de transformar a floresta em uma savana empobrecida, com morte maciça de grandes árvores e emissão de carbono, agravando o aquecimento global. Esse ponto de não-retorno havia sido estimado em 40% de floresta desmatada, mas estudos recentes, que consideram a soma dos impactos do aquecimento global e do desmatamento, colocaram o limite na faixa de 20% a 25%. O desmatamento na Pan-Amazônia já chegou a 15%; no Brasil, está em cerca de 20%.

Os efeitos da crise do clima também são sentidos em áreas costeiras, acometidas pela epidemia de branqueamento de corais em 2024, causada pelo aquecimento anormal do mar. Além disso, o aumento do nível do mar, um dos efeitos mais conhecidos da emergência climática — causado pelo aquecimento do oceano e derretimento de calotas polares —, pode afetar mais de 2 milhões de brasileiros até o fim deste século, como mostrou levantamento da *Climate Central* de 2024.

As capitais Rio de Janeiro, Fortaleza, Salvador, Recife, São Luís, Aracaju, João Pessoa, Natal e Maceió estão entre as mais vulneráveis ao aumento do nível do mar. Santos, no litoral de São Paulo, todo o litoral do Nordeste brasileiro e municípios próximos à divisa de Amapá e Pará também seriam extremamente afetados.

08c

## As pautas sociopolíticas

Para agir contra a crise do clima, não bastam boas intenções: cada país precisa colocar em prática um conjunto de políticas públicas, integrando setores e tomando decisões estratégicas que conduzam para a redução de emissões de gases de efeito estufa de maneira sustentável e justa. O mais importante instrumento para isso é a Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, da sigla em inglês para *Nationally Determined Contribution*), a meta de redução definida por cada país para cumprir o Acordo de Paris.

A primeira NDC brasileira foi apresentada em 2015, com a meta de reduzir em



37% as emissões do país até 2025 em relação ao que fora emitido em 2005. Além disso, indicava que as emissões poderiam ser reduzidas em 43% até 2030. A base de cálculo usada pela NDC de 2015 foi o Segundo Inventário Nacional de emissões de gases de efeito estufa. Os percentuais, aplicados a essa base, significariam que o Brasil deveria chegar a 2030 emitindo 1,2 bilhão de toneladas líquidas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e).

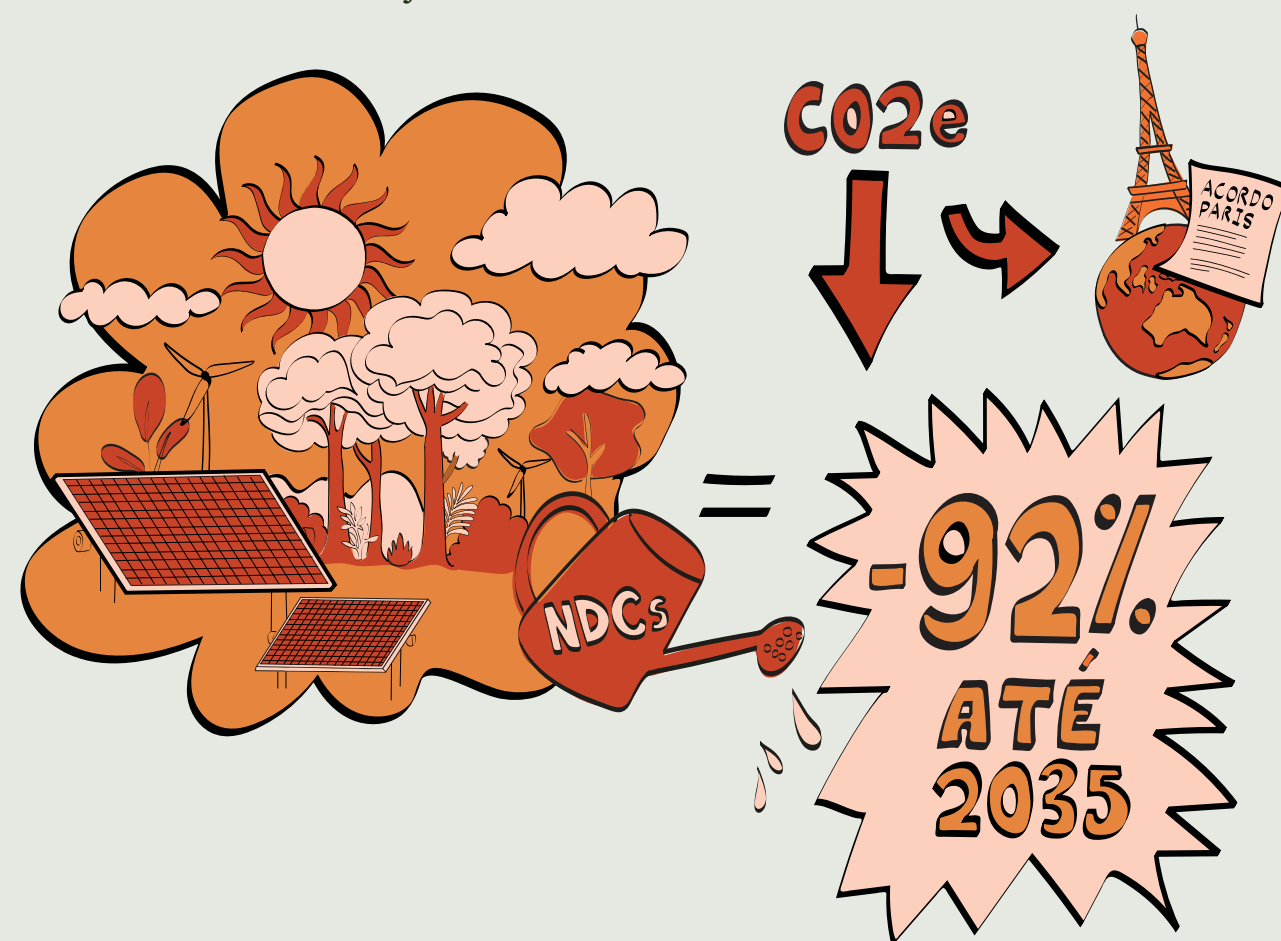
Em 2020, durante o governo Jair Bolsonaro, uma atualização da meta foi apresentada à Convenção do Clima da ONU. O episódio ficou conhecido como “pedalada climática”, já que o ex-ministro do Meio Ambiente, Ricardo Salles, submeteu ao órgão uma ambição menor de redução de emissões do que a apresentada em 2015 — contrariando as regras do Acordo de Paris. Segundo o tratado, a revisão das metas climáticas deve sempre torná-las mais ambiciosas, e não menos.

A manobra foi feita mudando a base de cálculo para as emissões brasileiras. Os percentuais de redução de emissões foram mantidos, mas a base adotada foi o Terceiro Inventário Nacional de Emissões (que calculava um valor de emissões muito mais alto em 2005 que o anterior, utilizado na meta de 2015). Pelo cálculo com base no terceiro inventário, o percentual de 43% de redução até 2030 significa a emissão de 1,6 bilhão de toneladas líquidas de CO<sub>2</sub>e – 400 milhões de toneladas a mais do que na meta original. Com isso, a meta brasileira passou de “insuficiente” para “altamente insuficiente”, segundo análise do consórcio internacional *Climate Action Tracker*.

Em 2021, o Brasil apresentou na conferência do clima de Glasgow uma segunda atualização da NDC, aumentando de 43% para 50% o percentual de redução de emissões para 2030. Foi usado como base de cálculo o Quarto Inventário Nacional. A mudança reduziu, mas não eliminou a manobra, permitindo ao Brasil emitir 73 milhões de toneladas a mais do que o inicialmente previsto.

A “pedalada” foi questionada na Justiça por seis jovens ativistas em 2021, com o apoio de oito ex-ministros do Meio Ambiente e assessoria técnica e jurídica do Observatório do Clima. Os jovens processaram o governo brasileiro pedindo a anulação da meta e a responsabilização da União, de Ricardo Salles e do ex-ministro de Relações Exteriores Ernesto Araújo.

Em 2023, a “pedalada” foi finalmente corrigida, já durante o governo de Luiz Inácio Lula da Silva – que citou a ação movida pelos jovens como motor do processo de revisão da meta climática brasileira. Ao final do mesmo ano, a Advocacia-Geral da União (AGU) e o Ministério do Meio Ambiente e Mudança no Clima (MMA) celebraram um termo de conciliação com os autores do processo, encerrando a batalha jurídica.



Um ano depois, em novembro de 2024, o Brasil apresentou sua nova meta climática, que compreende a redução de emissões para o ciclo de 2031 a 2035. O país foi o primeiro membro do G20 a apresentar a nova NDC e trouxe alguns avanços, mas ainda insuficientes para alinhar a ação climática do país à meta de estabilização do aquecimento global em 1,5°C. O país se comprometeu a limitar suas emissões líquidas em uma “faixa” que varia de 59% a 67% de redução de emissões em relação aos níveis de 2005 (~2.500 MtCO<sub>2</sub>e). Isso significa um limite de emissões de 1.050 MtCO<sub>2</sub>e (menos ambicioso) a 850 MtCO<sub>2</sub>e (mais ambicioso) em 2035.

Uma análise técnica do Observatório do Clima mostrou que o Brasil pode e deve fazer mais. O cumprimento de promessas já feitas pelo país, junto à continuidade de políticas já adotadas, levaria o país a um teto de emissões líquidas de 642 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub>e) em 2035, muito abaixo da “banda” de 1.050 MtCO<sub>2</sub>e a 850 MtCO<sub>2</sub>e adotada pelo governo na nova meta. O OC recomendou ao governo brasileiro que derrube a meta de 1.050 MtCO<sub>2</sub>e e use o limite mais estrito de 850 MtCO<sub>2</sub>e como piso para ambição e como orientação para a elaboração dos planos setoriais de mitigação, política pública elaborada com base na meta climática.

Além disso, o Observatório do Clima apresentou também em 2024 — antes do governo brasileiro — a sua própria proposta de NDC, como faz desde 2015 para democratizar o debate sobre as metas climáticas nacionais e estabelecer a barra de ambição. Com base na melhor ciência disponível, o OC mostra o que o país pode fazer para dar sua contribuição justa no combate à crise do clima — no caso da nova meta, chegar a 2035 emitindo 200 milhões de toneladas líquidas de CO<sub>2</sub> equivalente.

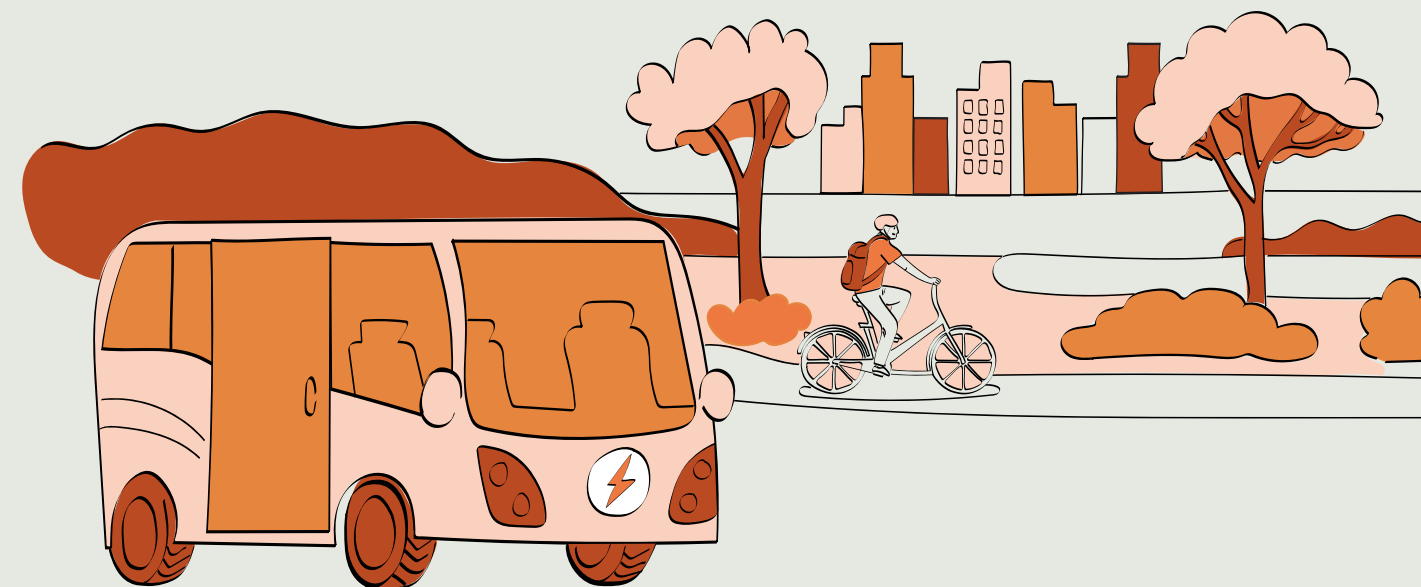
A partir de um cálculo da contribuição justa (*fair share*) do Brasil no esforço global de redução de emissões para 2035 — que pela primeira vez incluiu as emissões de desmatamento do país e, assim, permitiu uma estimativa mais precisa da contribuição histórica do Brasil ao aquecimento global —, o OC chegou a quatro cenários do limite de emissões para o país em 2035.

Adotou o mais conservador (um teto de emissões de 117 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente em 2035) e, após uma série de cálculos sobre todos os os setores da economia que emitem carbono (agropecuária, energia, resíduos, indústria e mudança de uso da terra), avaliou o que seria possível cortar de emissões e aumentar em remoções em cada um deles, para chegar o mais perto possível do fair share. Foi assim que se chegou ao número final, de 200 milhões de toneladas líquidas de CO<sub>2</sub> equivalente.

Outro importante instrumento da ação climática brasileira é a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), instituída em 2009, que oficializa o compromisso do país junto à Convenção do Clima da ONU. Para ser executada, essa política prevê uma série de instrumentos, como o Plano Nacional sobre

Mudança do Clima (Plano Clima), os planos de combate ao desmatamento nos biomas e o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (Fundo Clima). O Plano Clima, que deve ser o guia para ação climática do Brasil, é composto por uma estratégia nacional de mitigação, uma estratégia nacional de adaptação e estratégias transversais para a ação climática (nos eixos transição justa; meios de implementação e financiamento; educação, pesquisa, desenvolvimento e inovação; e monitoramento, gestão, avaliação e transparência).

As estratégias nacionais de mitigação e adaptação se desdobram em planos setoriais. São sete planos setoriais de mitigação (Agricultura e pecuária; Uso e Cobertura do Solo em Áreas Públicas; Cidades; Energia; Indústria; Resíduos; e Transportes) e 16 de adaptação (Agricultura e Pecuária; Agricultura Familiar; Biodiversidade; Cidades; Redução e Gestão de Riscos e de Desastres; Indústria e Mineração; Energia; Transportes; Igualdade Racial e Combate ao Racismo; Povos e Comunidades Tradicionais; Povos Indígenas; Recursos Hídricos; Saúde; Segurança Alimentar e Nutricional; Oceano e Zona Costeira; e Turismo).



# A sociedade civil



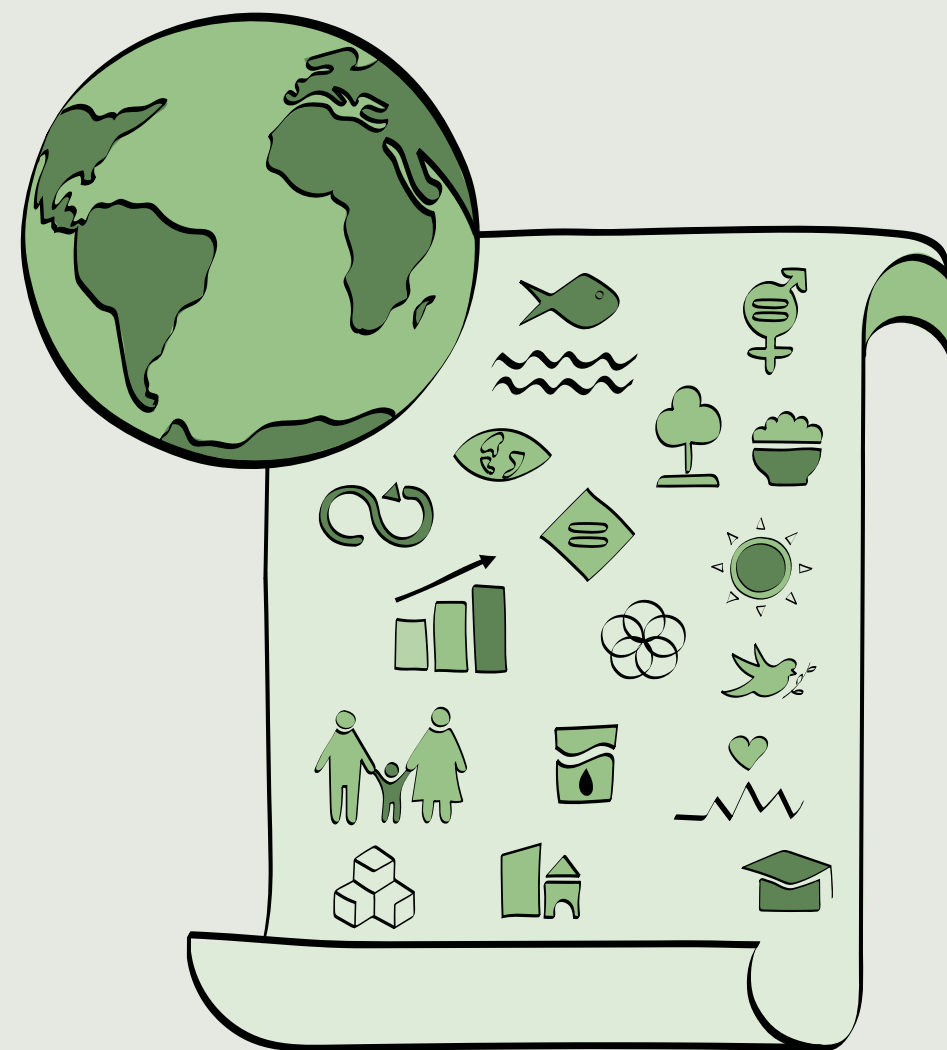
## O papel das organizações e da população na luta climática

Uma peça fundamental para pressionar aqueles com poder para frear o avanço das mudanças climáticas é a sociedade civil. As reivindicações relacionadas ao clima ganharam força nos anos 1990, mas já existia uma trajetória importante na área ambiental. Nos Estados Unidos, por exemplo, milhões de pessoas participaram do primeiro Dia da Terra em 22 de abril de 1970, protestando contra a poluição. Esses movimentos resultaram em importantes conquistas para o país, como a criação da Agência de Proteção Ambiental (EPA, na sigla em inglês) e a aprovação de leis como a Lei Nacional de Educação Ambiental, a Lei do Ar Limpo e, dois anos depois, a Lei da Água Limpa.



No Brasil, o movimento ambiental conseguiu incluir a proteção ao meio ambiente na Constituição Federal de 1988. O país abrigou importante mobilização da sociedade civil paralela à Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Rio-92, realizada no Rio de Janeiro (RJ) em 1992. Denominado Fórum Global, o evento reuniu cerca de 10 mil representantes de movimentos sociais e organizações não-governamentais de vários países.

A Agenda 21, documento sobre desenvolvimento sustentável assinado na Rio-92, reforçou o papel da sociedade civil. “Um dos pré-requisitos fundamentais para alcançar o desenvolvimento sustentável é a ampla participação da opinião pública na tomada de decisões. Ademais, no contexto mais específico do meio ambiente e do desenvolvimento, surgiu a necessidade de novas formas de participação”, destaca um trecho do capítulo 23 do documento.





Atualmente, a sociedade civil tem espaço garantido nas Conferências das Partes da Convenção do Clima (COPs) por meio do grupo de observadores. Embora não tenha poder de negociação, pode pressionar os diplomatas para que suas reivindicações sejam refletidas nos textos negociados. Em 2023, por exemplo, os países concordaram, no primeiro dia da COP28, em Dubai, em criar um fundo para financiar perdas e danos climáticos — uma demanda antiga pressionada pelos estados insulares e pela sociedade civil internacional.



As ONGs que participam das COPs estão organizadas em grupos conhecidos como *constituencies*, que incluem:

- **Bingo:** ONGs empresariais e industriais;
- **Engo:** ONGs ambientalistas;
- **Farmers:** ONGs de agricultores e pecuaristas;
- **IPO:** Organizações de povos indígenas;
- **LGMA:** Governos locais;
- **Ringo:** ONGs de pesquisa;
- **Tungo:** ONGs sindicais;
- **WGC:** ONGs que defendem os direitos das mulheres e a justiça de gênero;
- **Youngo:** Rede de organizações, grupos e indivíduos que atuam pelos direitos das crianças e dos jovens.

Desde 2016, também podem participar organizações religiosas e de educação. O papel da sociedade civil vai além das reuniões da ONU. Ela se manifesta por meio de protestos locais, produção de pesquisas e notas técnicas, ações judiciais, entre outras iniciativas.

A imprensa também exerce um papel fundamental na sociedade civil. Um exemplo de destaque é o jornal britânico *The Guardian*, que faz grande cobertura da crise climática. Em 2019, o jornal anunciou uma mudança editorial para enfatizar a gravidade do problema. Um ano depois, decidiu não aceitar publicidade de empresas ligadas a combustíveis fósseis.



# GRETA E AS GREVES

Em agosto de 2018, aos 15 anos, Greta Thunberg começou a faltar a aulas para protestar em frente ao parlamento sueco, em Estocolmo, com uma placa que dizia “greve escolar pelo clima”. Seu objetivo era chamar atenção para a inação governamental diante da crise climática.



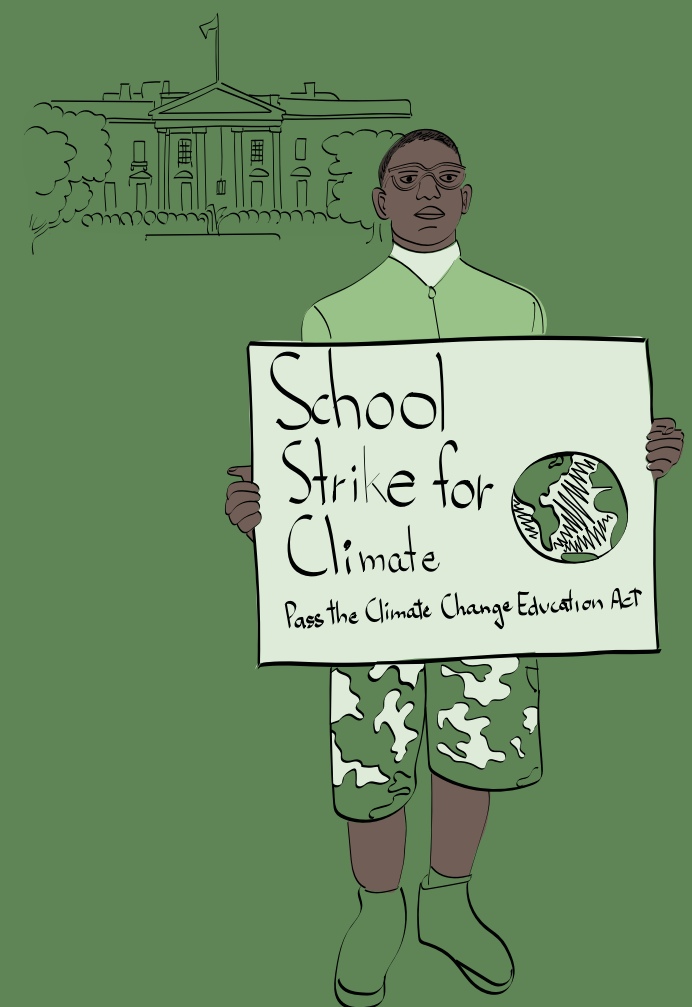
Filha de uma cantora de ópera e de um ator e portadora da síndrome de Asperger, um transtorno do espectro autista, Greta é parente distante de Svante Arrhenius — o químico que, no século 19, fez as primeiras estimativas sobre o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Ela começou a estudar sobre mudanças climáticas aos oito anos de idade. Aos 11, a conscientização sobre o tema a levou a uma depressão profunda.

No primeiro dia de greve, Greta protestou sozinha, mas logo outras pessoas começaram a se juntar a ela. O movimento, batizado de *Fridays for Future* (Sextas-feiras pelo Futuro), rapidamente ganhou alcance global impulsionado por postagens nas redes sociais.

Uma pesquisa realizada em 2021 pela Universidade de Viena, na Áustria, revelou que a maioria dos participantes de uma manifestação realizada em maio de 2019, em Viena, ao lado de Greta, olhava para o futuro com mais otimismo e acreditava na força do protesto como forma de mudança.

Em 20 de setembro de 2019, um ano e um mês após a primeira manifestação de Greta, cerca de 4 milhões de pessoas ao redor do mundo participaram da greve global pelo clima. Uma pesquisa de 2023, conduzida pela Universidade de Hamburgo, na Alemanha, mostrou que a estratégia do movimento *Fridays for Future* de realizar protestos múltiplos, descentralizados e menores ajuda a atrair mais pessoas para a causa.

Um dos influenciados por Greta é Jerome Foster II, afro-americano nascido em 2002. Entre 2019 e 2020, Foster passou mais de 50 semanas protestando às sextas-feiras em frente à Casa Branca, nos Estados Unidos. Durante a gestão do presidente Joe Biden, Foster foi convidado a integrar o conselho consultivo de justiça ambiental da Casa Branca. Ele, que também começou a se interessar pela crise climática ainda criança, busca aumentar a representatividade negra nos debates sobre clima.



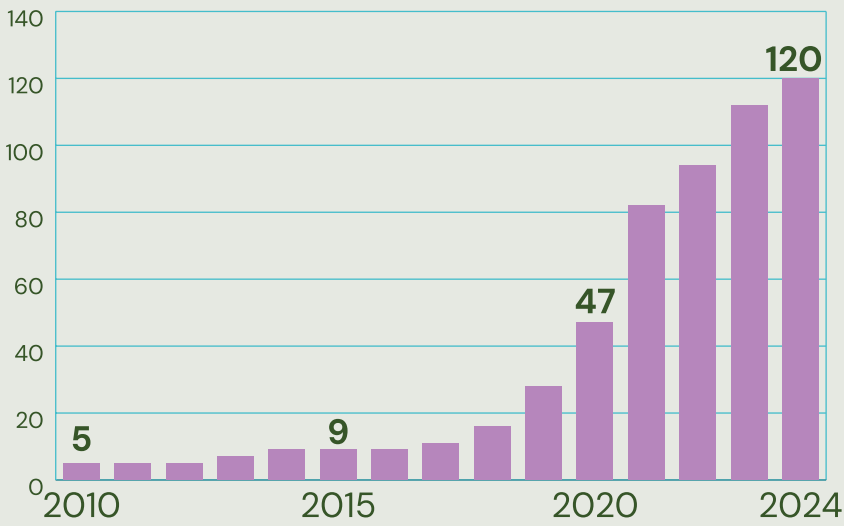
# Ações judiciais sobre clima

Processos cobrando ação climática têm ganhado espaço globalmente nas últimas décadas, contribuindo tanto para decisões específicas quanto para consolidar o entendimento jurídico sobre a urgência climática. Garantias constitucionais e legislação de direitos humanos, meio ambiente e clima embasam muitas dessas ações, que frequentemente responsabilizam governos e grandes poluidores.

Um relatório de 2024, da *London School of Economics* (LSE), revela aumento de 70% nos litígios climáticos desde o Acordo de Paris, em 2015. Baseado no banco de dados do Centro Sabin (Universidade Columbia), o estudo identificou 2.666 casos até 2023. ONGs e pessoas lideram as ações, embora governos também apareçam como autores. “Essa tendência reflete um esforço de atores da sociedade civil, alguns dos quais podem, de outra forma, estar excluídos das decisões sobre mudanças climáticas”, destaca o documento.

O Norte Global domina em número de casos, com os Estados Unidos à frente, somando 1.745 processos. O Sul Global, embora com menor representatividade,

Histórico acumulado de casos de litígio climático no Brasil



Fonte: JUMA/PUC-RJ

vem avançando, com mais de 200 casos (8% do total), e o Brasil desponta como líder na região, ocupando a quarta posição global, atrás apenas de EUA, Austrália e Reino Unido.

Nesse campo, a população mais jovem também tem se mobilizado. Em 2018, a Suprema Corte da Colômbia deu vitória a um grupo de pessoas de 7 a 26 anos que processou o governo por inação climática, exigindo a proteção dos direitos das futuras gerações. Com o apoio do climatologista James Hansen como *amicus curiae*, o processo liderado pela ONG Dejusticia foi o primeiro na América Latina contra um governo por questões climáticas. Uma das determinações da justiça foi a eliminação do desmatamento na Amazônia colombiana até 2020, meta que não foi cumprida.

Em 2020, 16 jovens, com idades de 5 a 22 anos, processaram o estado de Montana, nos Estados Unidos, por violar o direito a um ambiente limpo. Em 2023, a justiça determinou que o estado considerasse os impactos climáticos ao aprovar projetos de combustíveis fósseis, mas Montana recorreu em 2024.

No Brasil, seis jovens, incluindo a indígena Txai Suruí, moveram uma ação em 2021 contra a meta climática revisada do governo Bolsonaro, que aumentava as emissões previstas para 2025 e 2030, em comparação aos números de 2015. A mudança, chamada de “pedalada climática”, foi revertida em 2023 sob o governo Lula, que se comprometeu na ocasião a retomar os valores de 2015. A nova NDC brasileira foi anunciada em novembro de 2024, antes da COP29.



No fim do governo Bolsonaro, sete ações socioambientais e climáticas no Supremo Tribunal Federal\* definiram os rumos de políticas públicas ao determinar a efetivação de um plano para controle do desmatamento, a retomada do Fundo Amazônia, a abertura de crédito para ações de fiscalização e a reativação do Fundo Clima, entre outras ações.

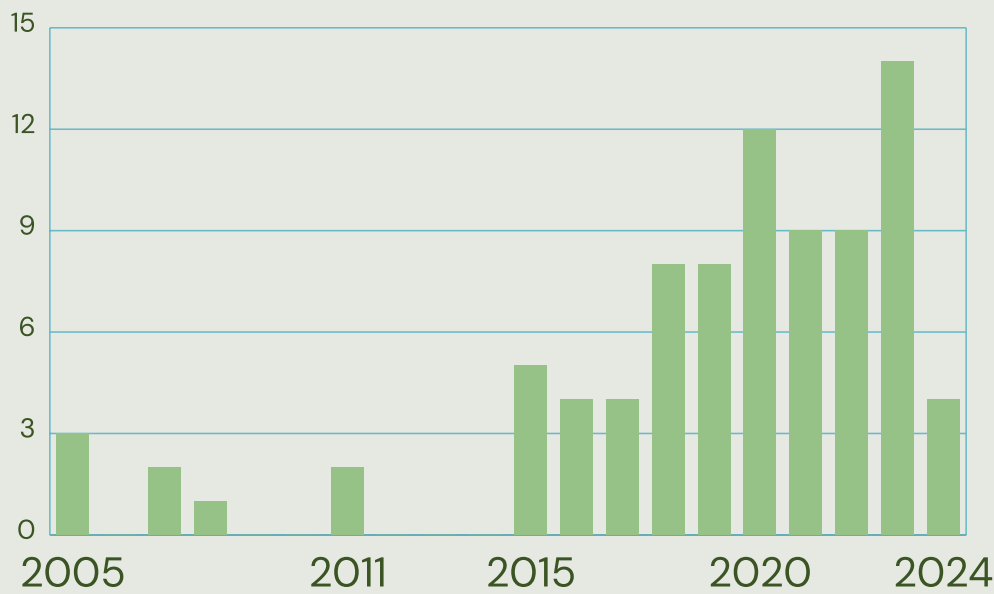
O litígio climático também tem envolvido grandes petroleiras. Um exemplo é o caso contra a Shell. Em 2019, organizações e cidadãos processaram a empresa na Holanda. Em 2021, o Tribunal de Haia ordenou que a Shell reduzisse suas emissões em 45% até 2030. A vitória foi considerada histórica no litígio climático, pois colocou uma grande petroleira sob pressão, mas a empresa recorreu. Em novembro de 2024, a decisão foi anulada em segunda instância. Os processos contra petroleiras também aumentaram após o Acordo de Paris.



\*Conheça o livro “Litígio estratégico climático em rede: experiências contra retrocessos socioambientais por meio do judiciário no período 2020-2024”



### Processos contra empresas produtoras de combustíveis fósseis



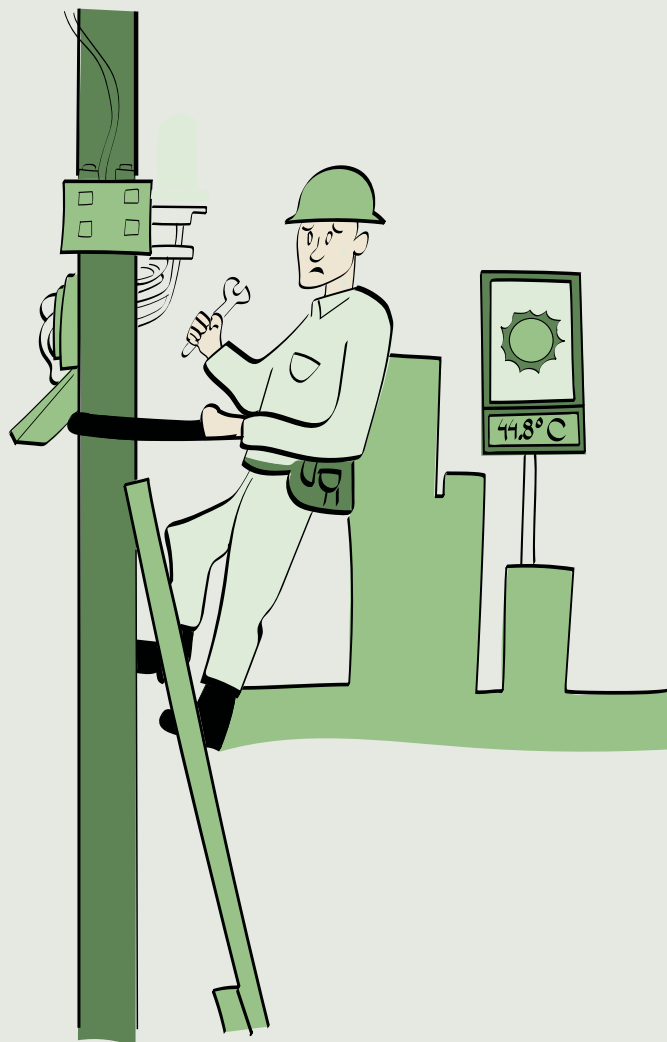
Observações: Os dados de 2024 incluem apenas os casos registrados até julho. Antes de 2005, apenas um caso havia sido registrado contra a Shell na Nigéria, em 1998. Fonte: Centro Sabin para Direito sobre Mudanças Climáticas / Análise do Zero Carbon Analytics

09c

## Justiça climática para enfrentar os impactos das mudanças do clima

Quando falamos sobre mudanças do clima, as discussões também devem considerar a chamada justiça climática. O conceito vem a partir da conclusão de que aqueles que menos contribuem para o problema são os mais afetados pelos impactos causados por eventos extremos, como ondas de calor e frio, fortes chuvas e secas. Casos de grupos formados por populações pobres, trabalhadores, pessoas negras, com deficiências, indígenas, mulheres e a população LGBTQIAPN+. Ou seja: a crise do clima atinge a todos, mas de maneiras diferentes, além de agravar desigualdades.





Assim, a crise climática passa a ser entendida também como um problema social — e as soluções são vistas como parte de uma luta política coletiva. Em resumo, as reivindicações por justiça buscam equidade no enfrentamento dos impactos das mudanças climáticas.

Desde os anos 1990, movimentos sociais — principalmente de indígenas e populações negras — incorporaram a justiça climática em suas demandas. A Rio-92 marcou a primeira sinalização institucional do tema, com a UNFCCC reconhecendo as “responsabilidades comuns, mas diferenciadas” entre países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Jovens lideranças também têm se destacado na luta por justiça climática, como a ugandense Vanessa Nakate. Nascida em 1996, ela começou a se engajar em 2018, após pesquisar sobre os desafios climáticos em Uganda. Em 2019, Nakate iniciou protestos para chamar atenção para a emergência climática e a destruição da floresta do Congo, a maior floresta tropical da África.



## CRISE CLIMÁTICA AGRAVA DESIGUALDADES SOCIAIS

O papel das mudanças climáticas na piora das desigualdades é apontado por pesquisas acadêmicas. Um artigo de revisão publicado em 2024 classifica o agravamento das desigualdades como um efeito terciário da crise climática, resultante das mudanças em padrões de tempo e clima (efeito primário) e nos ecossistemas (efeito secundário), além de ser o resultado de respostas sociopolíticas, econômicas e culturais.

### Efeitos terciários

Mudanças na sociedade

### Efeitos secundários

Mudanças nos ecossistemas

### Efeitos primários

Mudanças nos padrões de tempo e clima

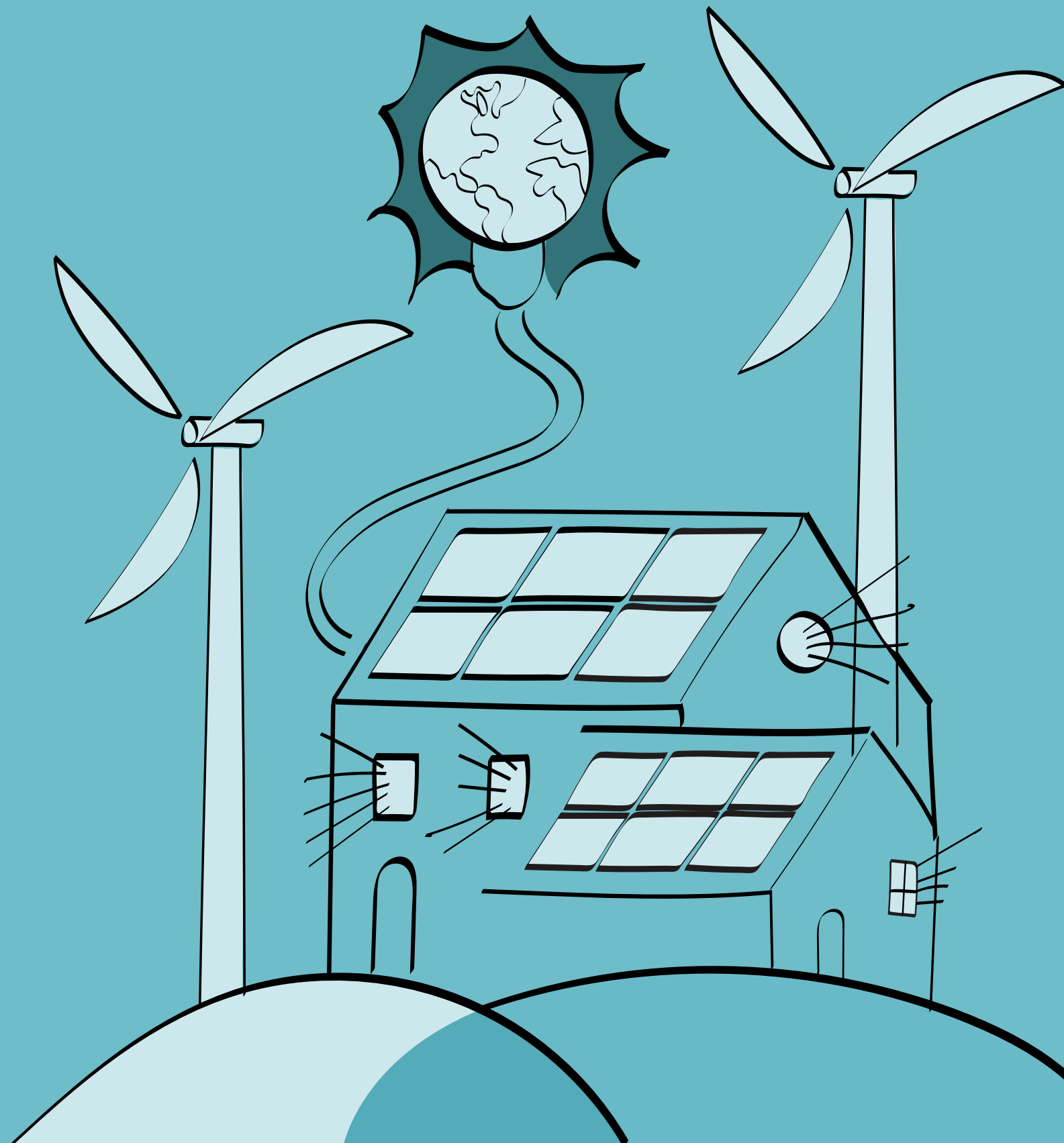


Fonte: Estudo publicado na revista Pediatric Research (grupo Nature). Climate change and inequality

Outro estudo de 2024 projeta que, até 2100, os impactos climáticos poderão aumentar a desigualdade econômica em 1,4 pontos no índice de Gini — um indicador socioeconômico. Os pesquisadores destacam que limitar o aumento da temperatura global a 1,5°C pode reduzir o crescimento das desigualdades econômicas em dois terços a longo prazo, embora cause um leve aumento no curto prazo. Políticas bem planejadas podem ajudar a estabilizar o clima e promover a inclusão econômica.

Uma revisão de literatura publicada em 2024, que analisou 127 estudos sobre mudanças climáticas e desigualdades, constatou que 78% deles concluíram que a crise climática amplia as desigualdades, afetando desproporcionalmente as populações mais pobres, tanto globalmente quanto dentro dos países de todos os continentes.

A energia

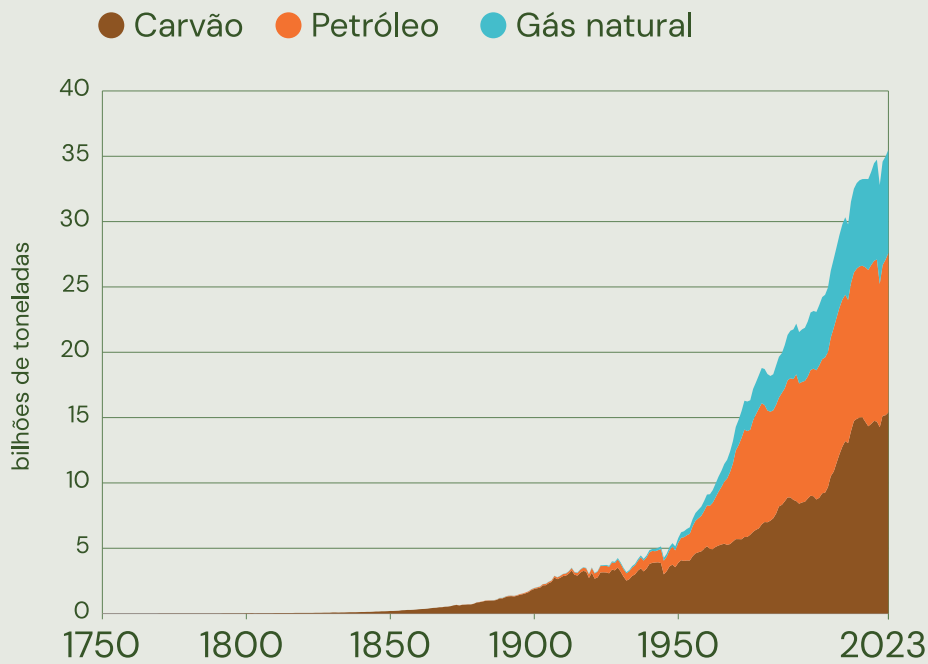


# Como o sistema energético impacta o clima

Nos capítulos anteriores, mostramos como os combustíveis fósseis se formaram e por que o uso deles se tornou o principal responsável pelas mudanças climáticas. E também como as empresas petrolíferas, mesmo cientes dos efeitos negativos, optaram por negar as evidências e disseminar desinformação. Neste capítulo, exploraremos o papel predominante que os combustíveis fósseis ainda ocupam na matriz energética global e a importância de uma transição energética que seja tão rápida quanto justa para enfrentar esse problema.

De acordo com o IPCC, limitar o aquecimento global a bem abaixo de 2°C é impossível sem reduções rápidas e significativas nas emissões provenientes do sistema de energia. Atualmente, o carvão mineral, o petróleo e o gás ainda representam cerca de 80% da matriz energética global.

Emissões globais de CO<sub>2</sub> por tipo de combustível fóssil



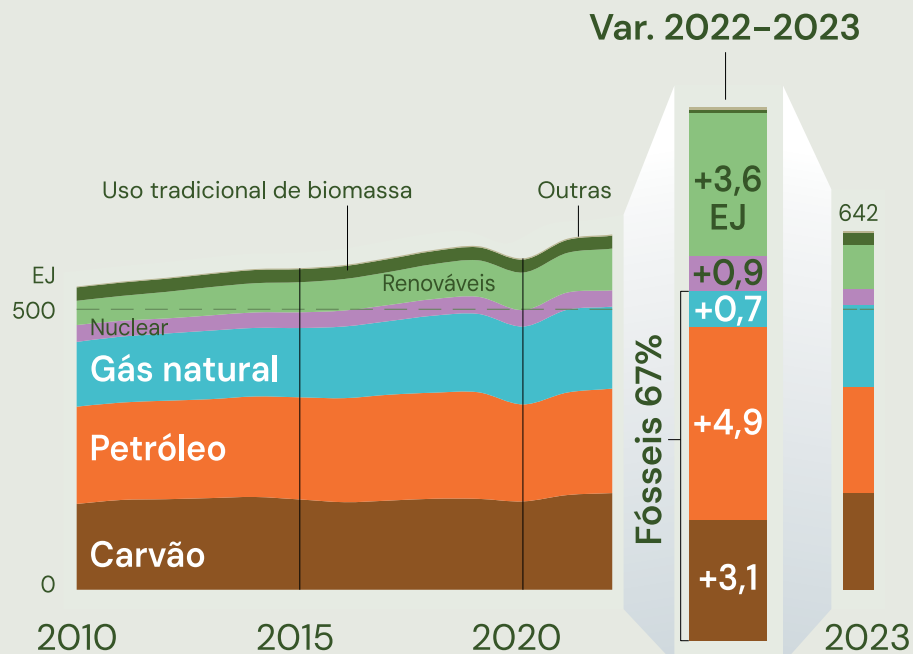
Fonte: Orçamento Global de Carbono (2024) / Our World in Data

A Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês) destaca que os investimentos em outros tipos de energia estão em crescimento, mas alerta que esse avanço não será suficiente para conter a crise climática se o uso de combustíveis fósseis não diminuir rapidamente. A agência também aponta que o progresso na transição energética pode permitir o crescimento econômico global sem depender de carvão, petróleo e gás.

Análises indicam que a demanda global pelos três combustíveis fósseis deve atingir o pico antes de 2030 e, depois disso, começar a cair. No entanto, essas tendências variam entre os países devido às diferenças nos estágios de desenvolvimento econômico e energético.

A promessa de eliminar gradualmente o carvão, o petróleo e o gás da matriz energética não passa disso. A demanda global de energia continua dominada pelos fósseis, muitos países — incluindo o Brasil — querem abrir novas fronteiras de exploração, e as nações mais pobres precisam de apoio financeiro para arcar com os custos iniciais de tecnologias de energia renovável.

Demanda global de energia



Fonte: IEA

Em 2023, após três décadas de conferências do clima, pela primeira vez foi registrada oficialmente a necessidade de “fazer a transição para longe dos combustíveis fósseis nos sistemas energéticos de forma justa, ordenada e equitativa, acelerando a ação nesta década crítica para alcançar a emissão líquida zero até 2050, em linha com a ciência”. O texto do Balanço Global apresentado na COP28, em Dubai, no entanto, foi considerado insuficiente por não incluir prazos, garantias de financiamento para essa transição e também por admitir algumas “distrações perigosas”, como falar apenas na redução progressiva do carvão (e não na eliminação).

A seguir, apresentamos o panorama dos três combustíveis fósseis.

10b

## Carvão: o primeiro a ser eliminado?

O carvão mineral, o mais antigo e poluente entre os combustíveis fósseis, deveria ser o primeiro a ser eliminado das matrizes energéticas. O uso dele ocorre há pelo menos 4 mil anos, mas o consumo em larga escala teve início por volta de 1760, durante a Revolução Industrial, quando passou a ser empregado como fonte de energia para máquinas a vapor e altos-fornos.

O uso se expandiu pela Europa e outros continentes, apoiando a industrialização de países como os Estados Unidos. Hoje, apesar de não ser o fóssil mais utilizado — posto ocupado pelo petróleo —, o carvão ainda é amplamente produzido e consumido em países como a China, que lidera o ranking mundial. Um terço de todo o carvão consumido no planeta é usado em usinas de energia no país.



De acordo com a IEA, o carvão é responsável por cerca de um terço da geração global de eletricidade. “Ele continuará a desempenhar um papel crucial na produção de ferro e aço até que novas tecnologias estejam disponíveis”, diz a agência.

Na maioria dos países avançados a demanda por carvão atingiu o pico há alguns anos e está em declínio. O Reino Unido, berço da Revolução Industrial, fechou sua última usina de carvão em 2024. Entretanto, nações como a Austrália continuam a expandir a produção. No Brasil, apesar de o carvão responder por apenas 4,4% da matriz energética e 1,9% da matriz elétrica, há forte pressão da indústria para manter seu uso. A Lei 14.299, de 2022, assegurou a compra antecipada de energia elétrica gerada pelo Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, formado por três usinas térmicas a carvão, até 2040.

O Observatório do Clima defende\* que o Brasil deve zerar o uso de carvão mineral para geração elétrica em 2027, ano em que as termelétricas devem ser fechadas, e manter a fonte apenas para o uso industrial por curto período, com substituição do carvão mineral por fontes renováveis. Até 2050, o carvão deve ser totalmente descartado da matriz elétrica e do uso industrial no país, que deve instituir compensações socioeconômicas pela perda de empregos e a reestruturação econômica de sua região carborífica.

A IEA afirma que, para conter o aquecimento global, o carvão sem captura de carbono deve ser completamente eliminado do setor energético até 2040.

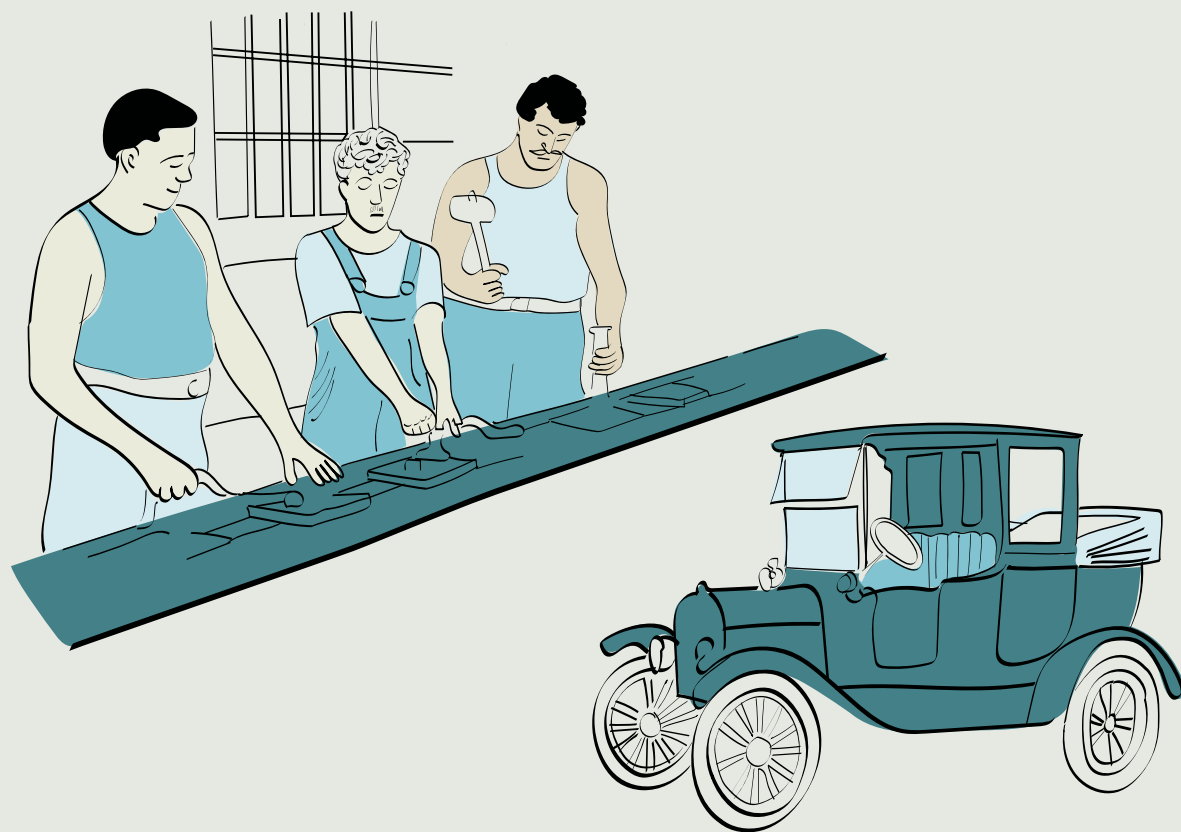
\* Conheça o relatório “Futuro da Energia: visão do Observatório do Clima para uma transição justa no Brasil”





## A ascensão e o poder do petróleo

O petróleo começou a ganhar destaque no século 19, sendo utilizado principalmente para a geração de eletricidade. Com a invenção do motor a combustão, especialmente no início do século 20, quando Henry Ford iniciou a produção em massa de automóveis, o uso do óleo avançou, fazendo com que ele atingisse um status privilegiado.



Grandes petroleiras surgiram nesse período. Negócios que deram origem às gigantes Shell e Exxon Mobil, por exemplo, começaram a se desenvolver em meados dos anos 1800. A Saudi Aramco, maior petroleira do mundo, foi fundada em 1933. Já a Petrobras, referência em exploração de petróleo em águas profundas e ultraprofundas, foi criada pelo presidente Getúlio Vargas em 1953, na esteira da campanha “O petróleo é nosso”.

Atualmente, lobistas que representam essa indústria têm passe livre nas conferências do clima. Na COP29, em 2024, por exemplo, foram registrados ao menos 1.773

representantes do lobby fóssil. Para comparação, as delegações dos dez países mais afetados pelas mudanças climáticas somaram 1.033 pessoas. A sociedade civil critica a presença da indústria fóssil devido ao poder de influência que ela exerce nas negociações climáticas.

De acordo com a IEA, o uso de petróleo para transporte deve entrar em declínio por conta do aumento na comercialização de carros elétricos. O pico de demanda também é previsto para a produção de plásticos e outros produtos químicos à base de petróleo, que ainda impulsionam o consumo global.

Segundo a agência, os países, no entanto, devem manter estoques estratégicos de petróleo para evitar interrupções graves no fornecimento que possam impactar o mercado global, como em casos de guerra. Isso não justifica, porém, abrir novas fronteiras para exploração – algo que grandes produtores de petróleo seguem planejando. Os Estados Unidos, maior produtor mundial, Canadá, em 4º lugar, e Brasil, na 8ª posição, segundo ranking do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, são exemplos de países que querem investir em novos projetos de exploração, mesmo diante do agravamento da crise climática.

No caso brasileiro, a proposta governamental de aumento de exploração tem priorizado a abertura de novas fronteiras exploratórias, mesmo em áreas ambientalmente sensíveis, como a bacia da Foz do Amazonas e outras áreas da Margem Equatorial brasileira, e a bacia de Pelotas. A opção por investir na exploração de novas reservas petrolíferas implica desviar recursos de fontes renováveis e desestimular o processo de transição da nossa matriz energética, ainda muito dependente de petróleo e gás fóssil.

# O SURGIMENTO DO IMPÉRIO DAS PETROLEIRAS

Registros históricos indicam que o petróleo bruto já era utilizado por civilizações há pelo menos 6.000 anos antes da Era Cristã. Os chineses, por exemplo, usavam o produto para iluminação e aquecimento. Contudo, o primeiro poço comercialmente viável só foi perfurado em 1859, na Pensilvânia, Estados Unidos, pela Seneca Oil Company, fundada quatro anos antes como Pennsylvania Rock Oil Company.

Pouco tempo depois, a empresa pioneira perdeu espaço para a Standard Oil Company, criada em 1870 por John D. Rockefeller, considerado o primeiro bilionário da história. Embora reconhecido como um filantropo que fez grandes doações para a educação, Rockefeller também foi criticado por práticas trabalhistas opressivas.



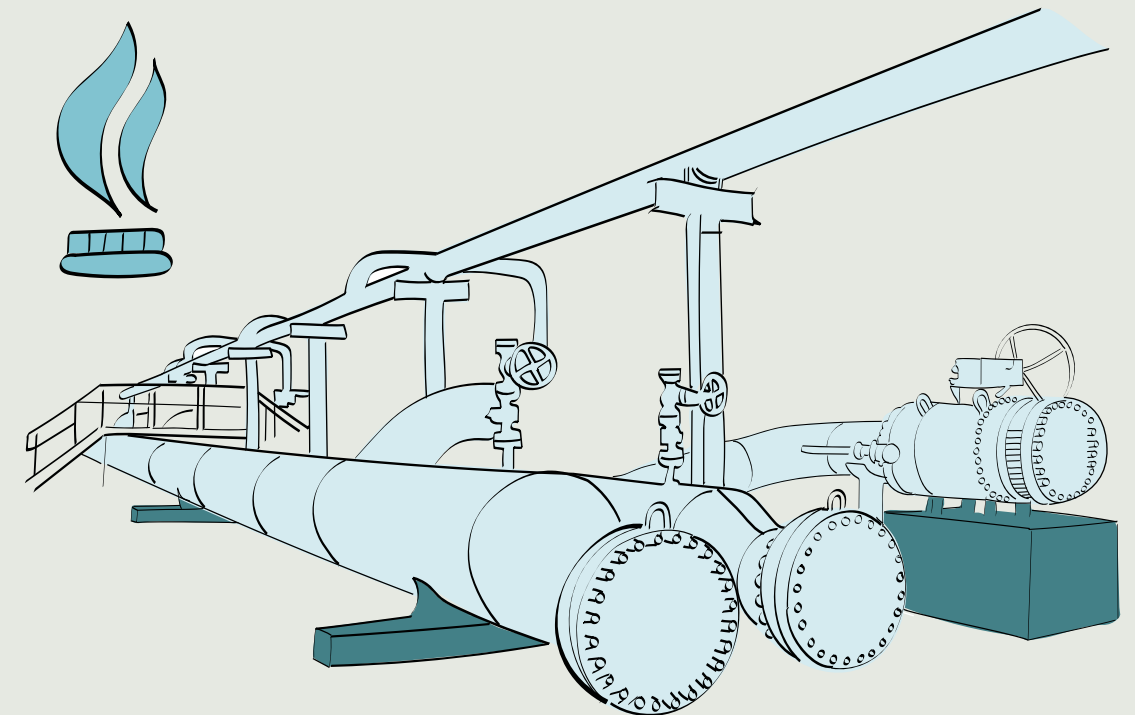
O magnata chegou a controlar cerca de 80% do mercado de petróleo, mas o monopólio dele foi dissolvido pela Suprema Corte dos Estados Unidos em 1911, com base na Lei Antitruste Sherman. A empresa foi dividida em 34 companhias. Ainda assim, anos mais tarde, o setor voltou a ser dominado por um pequeno número de grandes corporações. As empresas Standard Oil of New Jersey (Esso, depois Exxon), Standard Oil of New York (Mobil), Standard Oil of California (Socal, mais tarde Chevron), Texaco, Gulf, Royal Dutch Shell (atual Shell) e Anglo-Persian (atual British Petroleum, BP) ficaram conhecidas como as “Sete Irmãs”.

A Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), formada em 1960 por Irã, Iraque, Kuwait, Arábia Saudita e Venezuela, foi criada para romper o domínio dessas corporações.

10d

## Gás: o combustível da transição?

O gás foi o último combustível fóssil a se popularizar. O consumo cresceu significativamente após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), impulsionado pelo avanço na construção de gasodutos, especialmente nos Estados Unidos. Segundo a IEA, o gás é responsável por cerca de um quarto da geração global de eletricidade.



Apresentado frequentemente como um combustível de transição para conter as mudanças climáticas, o gás ganhou espaço no texto do Balanço Global aprovado em 2023, durante a COP28, em Dubai, que destaca a necessidade de “fazer a transição para longe dos combustíveis fósseis nos sistemas energéticos”.

O principal argumento a favor do gás é que ele emite menos CO<sub>2</sub> do que o carvão e o petróleo. A queima de gás libera 40% menos CO<sub>2</sub> em comparação ao carvão para a mesma quantidade de energia gerada. No entanto, especialistas alertam que o uso contínuo de gás como fonte de energia prolonga a dependência de combustíveis fósseis, comprometendo os esforços contra as mudanças climáticas. Além disso, o gás contém metano, um gás de efeito estufa 28 vezes mais potente que o CO<sub>2</sub>, que pode vazar durante a produção e o transporte.

Outro problema é a extração de gás por meio do fraturamento hidráulico (fracking), técnica que injeta grandes quantidades de água, areia e produtos químicos para romper rochas e liberar o combustível. O fracking não apenas consome muita energia, mas também gera impactos ambientais significativos.

Se a aposta no uso de gás fóssil para a transição já é questionada globalmente, no Brasil ela é ainda mais problemática. Diferentemente dos países nos quais a matriz elétrica é majoritariamente dependente de carvão e derivados de petróleo, o Brasil já tem as fontes eólica e solar em papel de destaque na sua matriz elétrica. Segundo o Balanço Energético Nacional, da Empresa Brasileira de Pesquisa Energética, a fonte eólica ocupa o segundo lugar e a solar, o quarto, entre as fontes que mais produziram eletricidade em 2023. A geração hidrelétrica ocupa a primeira posição e a biomassa, a terceira. O gás fóssil aparece somente em quinto lugar, indicando que a aposta em sua expansão não seria um caminho de transição, mas sim de retrocesso.

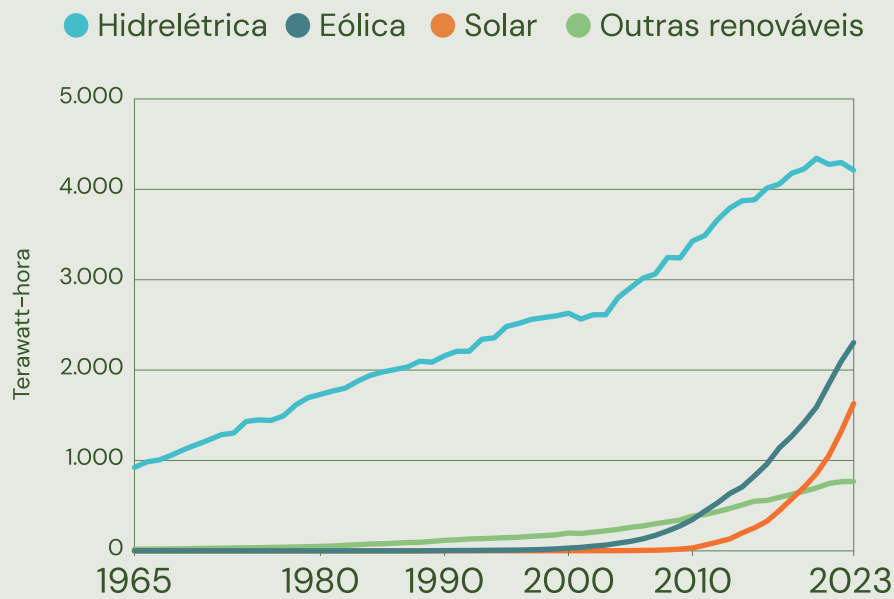
10e

## A expansão das energias renováveis

A transição do atual sistema energético passa, sobretudo, pelas energias renováveis, que são geradas a partir de fontes naturais e emitem muito menos gases de efeito estufa do que a queima de combustíveis fósseis. Diferentemente das fontes fósseis, as renováveis são constantemente reabastecidas e se regeneram mais rapidamente do que são consumidas. No entanto, não existe uma “solução mágica”. As fontes renováveis também podem gerar impactos ambientais e afetar populações locais. Por isso, é essencial que essa transição energética seja sustentada por regras claras, legislações robustas e monitoramento eficiente para garantir que ela seja sustentável e justa para a sociedade.

A capacidade global de geração de energia renovável tem crescido rapidamente, especialmente as fontes eólica e solar. Enquanto a geração de energia hidrelétrica, a fonte renovável mais abundante até o momento, aumentou 22,83% entre 2010 e 2023, a geração solar e eólica registrou crescimentos de 4.961,80% (crescendo 50,62 vezes) e 566,18% (crescendo 6,66 vezes), respectivamente.

### Crescimento da geração global de energia renovável por fonte

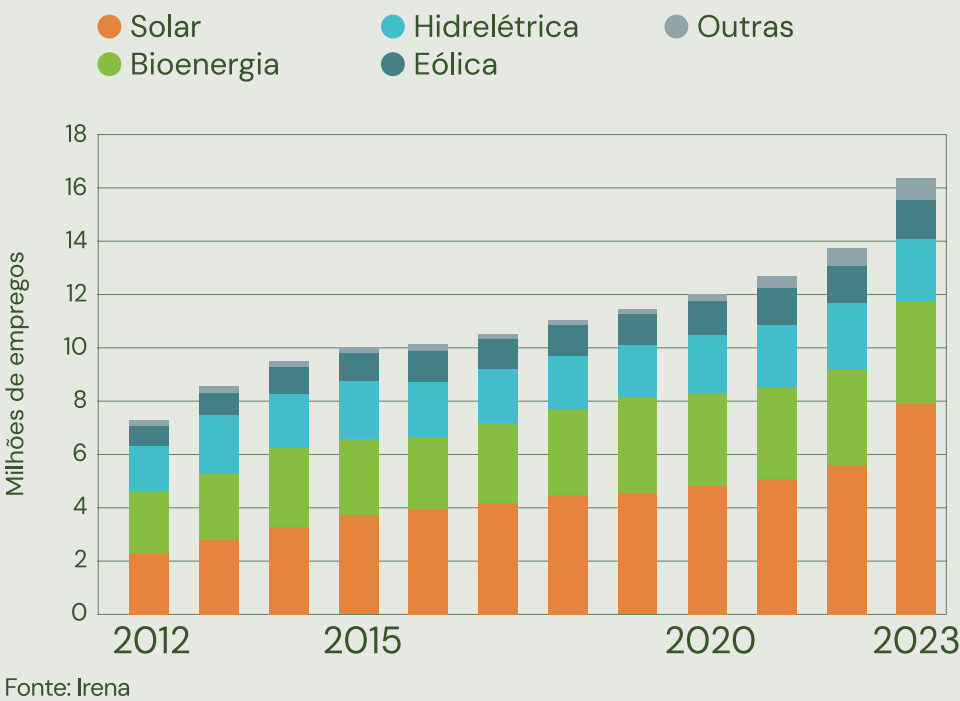


Fonte: Energy Institute – Revisão Estatística da Energia Mundial (2024) / Our World in Data

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o setor de eletricidade é o principal beneficiado, impulsionado pelo avanço das energias solar e eólica, além da contribuição significativa das hidrelétricas. Projeções indicam que, até 2030, quase metade da eletricidade gerada no mundo virá de fontes renováveis. Contudo, é importante lembrar que a eletricidade corresponde a apenas um quinto do consumo global de energia. Por isso, as fontes renováveis ainda precisam expandir seu papel em setores como transporte e aquecimento, conforme destaca a IEA.

Além de contribuir para a descarbonização, o avanço das energias renováveis também tem gerado mais empregos. De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (Irena, na sigla em inglês), o setor empregou 16,2 milhões de pessoas direta e indiretamente em 2023, com destaque para as áreas de energia solar, eólica, hidrelétrica e bioenergia. Esse número representa um crescimento expressivo em relação a 2012, quando o setor empregava 7,3 milhões de trabalhadores.

# Evolução global de empregos em energia renovável por tecnologia

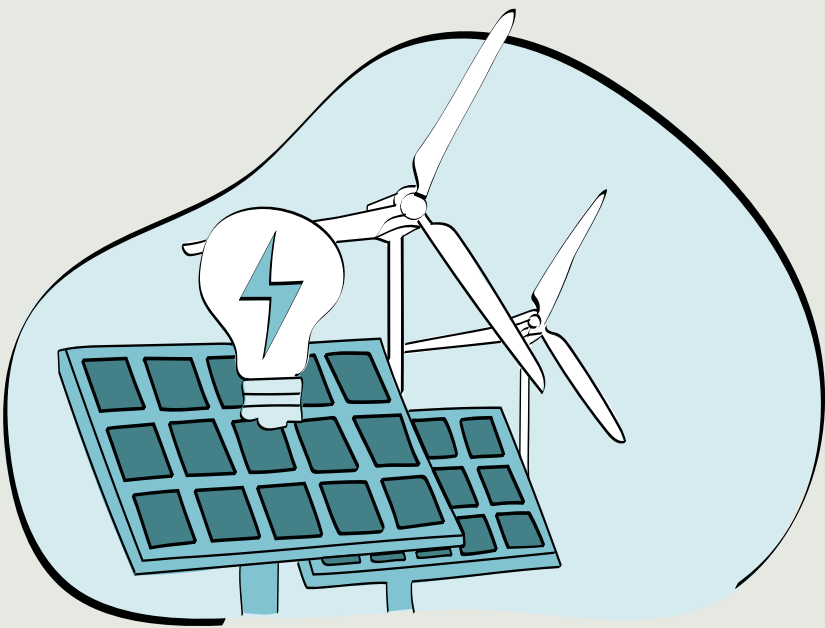


A seguir, explicamos como funciona cada fonte considerada renovável.

## Solar

A energia solar é obtida por meio da conversão da luz do sol, permitindo a produção de calor, refrigeração, iluminação, eletricidade e até combustíveis. Isso é feito principalmente com o uso de painéis fotovoltaicos, que convertem a radiação solar em energia. Outra possibilidade é o uso de espelhos para concentrar e armazenar a radiação solar.

Os painéis fotovoltaicos podem ser utilizados tanto para geração de energia em larga escala quanto em pequenas instalações, como sistemas residenciais em telhados. O uso doméstico, além de ser sustentável, pode reduzir os custos da “conta de luz” das famílias.



No entanto, a energia solar enfrenta algumas limitações, como a dependência das condições climáticas. Regiões com alta incidência de chuvas e nuvens podem encontrar desafios para o uso intensivo. Além disso, é fundamental adotar práticas que evitem o desmatamento de áreas destinadas a usinas solares, além de minimizar os impactos socioambientais da extração de minerais, como o silício, matéria-prima dos painéis. O investimento em reciclagem e reuso dos painéis também é essencial para reduzir o volume de lixo gerado.

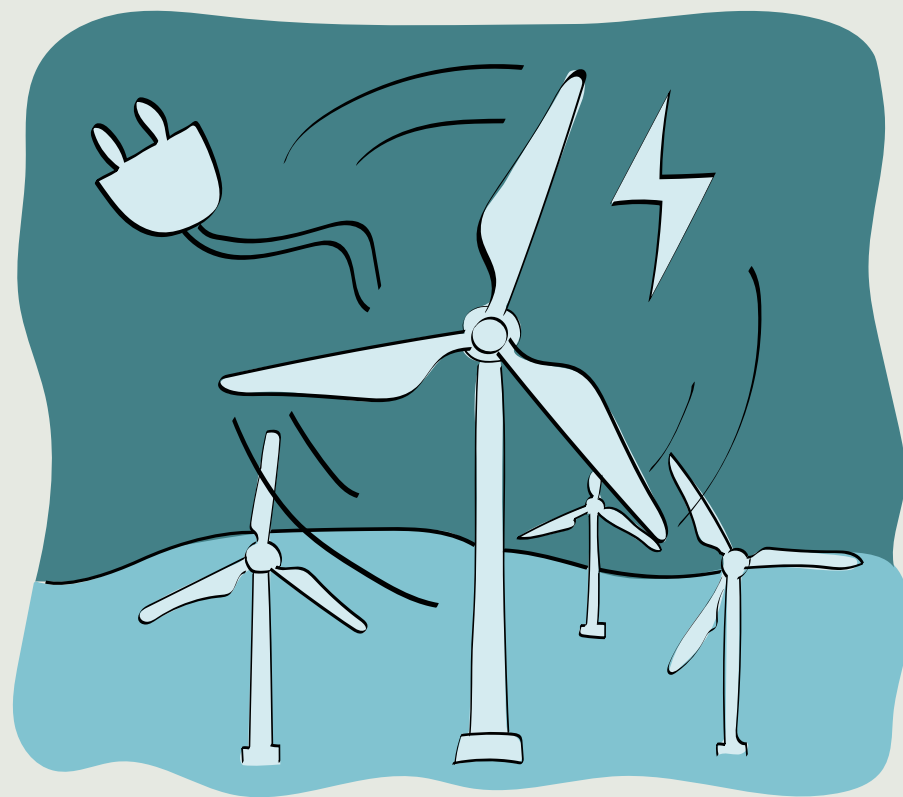
## Eólica

A energia eólica é gerada pelo movimento do vento, utilizando grandes turbinas que podem ser instaladas em terra (onshore) ou no mar e águas doces (offshore). Assim como a solar, é considerada uma fonte renovável variável, pois a produção depende de fatores naturais e climáticos, como a localização geográfica, as condições meteorológicas e até a hora do dia, que influenciam a velocidade dos ventos e a eficiência das turbinas.

A implantação de parques eólicos exige atenção para evitar impactos socioambientais, como o ruído que pode afetar comunidades próximas, a ocupação desordenada de terras e os riscos para a vida de aves e morcegos.



No Brasil, representantes das comunidades afetadas pela geração de energia eólica no Nordeste elaboraram em 2024 um documento com mais de cem recomendações para mitigar danos e impactos da atividade. As Salvaguardas Socioambientais para Energia Renovável\* propõem um conteúdo mínimo contratual para arrendamento, que evitaria contratos desequilibrados entre empresas e pequenos proprietários ou posseiros, que arrendam suas terras para a instalação das usinas; o estabelecimento de uma distância mínima de dois quilômetros da torre eólica para edificações; a priorização de áreas degradadas para instalação de centrais, o que evitaria mais desmatamento; e estudos sobre poluição sonora.



\* Leia mais sobre salvaguardas socioambientais:

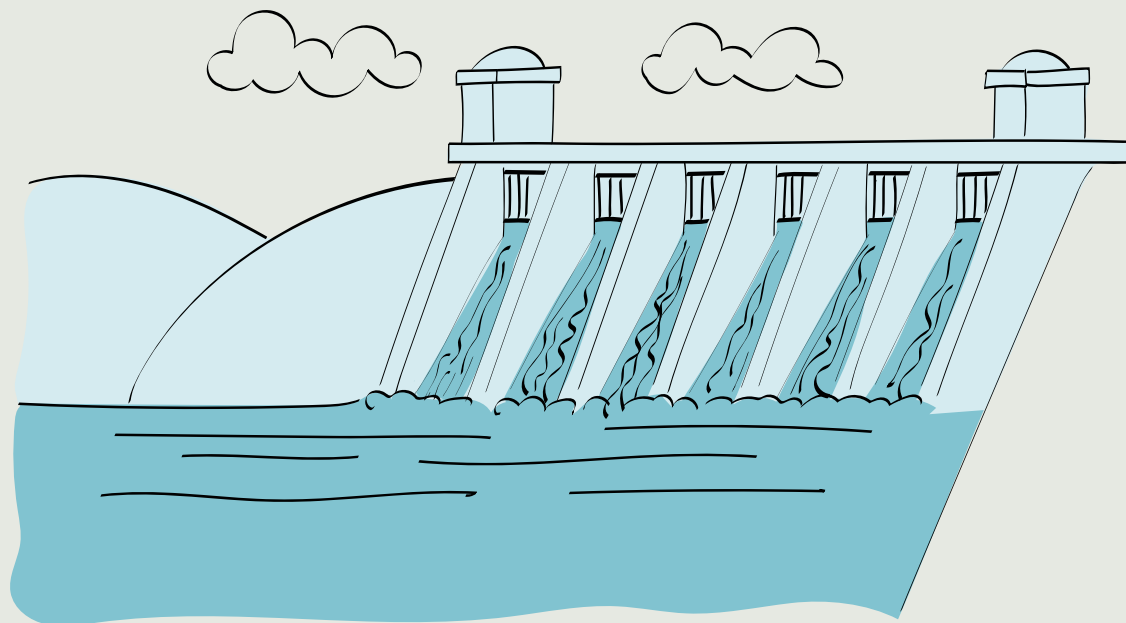


## Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é gerada pela água represada em movimento, que se desloca de áreas mais altas para mais baixas. Pode ser obtida em rios ou reservatórios que, além de produzir energia, podem ser usados para abastecimento de água potável, irrigação e controle de eventos extremos, como enchentes e secas.

Embora a produção possa ser impactada por mudanças nos padrões de chuva, essa é uma fonte mais previsível que a solar e a eólica, principalmente em usinas com barragens e tecnologias de controle de fluxo d'água.

Hidrelétricas de menor porte, instaladas em áreas de baixo impacto ambiental, são as ideais, pois grandes estruturas, como a usina de Belo Monte, no Pará, provocam graves danos à vegetação, à fauna e às comunidades locais. Além disso, a construção de hidrelétricas em larga escala demanda grandes volumes de cimento, cuja fabricação emite altos níveis de gases de efeito estufa.



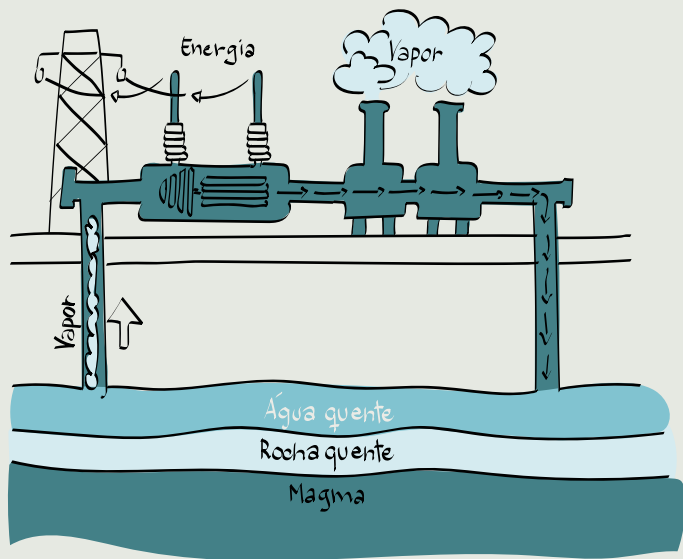
## Geotérmica

De aplicação mais limitada, a energia geotérmica é gerada pelo calor do interior da Terra, extraído de reservatórios geotérmicos por meio de poços. Esse calor pode ser usado para produzir eletricidade ou aquecer ambientes. Alguns reservatórios contêm água naturalmente aquecida pelo núcleo terrestre, graças às rochas quentes que absorvem o calor do magma na crosta terrestre.

Essa fonte é mais abundante em regiões próximas a bordas de placas tectônicas, onde há maior movimentação capaz de causar fraturas na crosta. Segundo a IEA, a energia geotérmica pode fortalecer a segurança energética em países dependen-

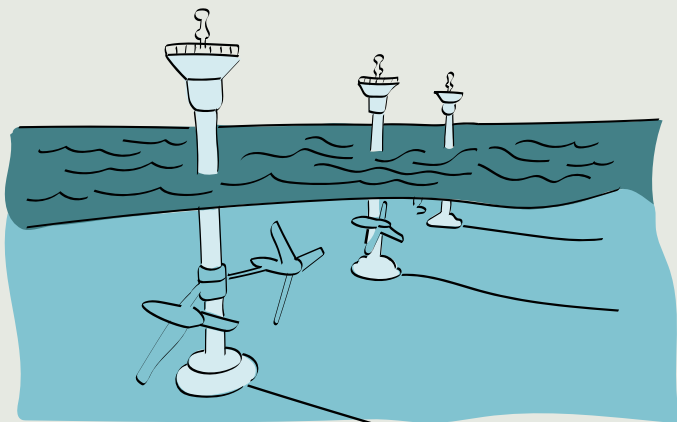
tes do carvão, como China e Índia, e complementar a geração solar e eólica na Europa e nos Estados Unidos.

A agência também explica que o investimento em energia geotérmica é benéfica para a indústria de petróleo e gás, devido ao conhecimento do subsolo e reaproveitamento da tecnologia de perfuração, o que pode reduzir rapidamente os custos. Outra vantagem é o reaproveitamento da mão de obra qualificada do setor. “Muitas pessoas que trabalham com geotérmica hoje vieram do setor de petróleo e gás”, diz a IEA.



## Maremotriz

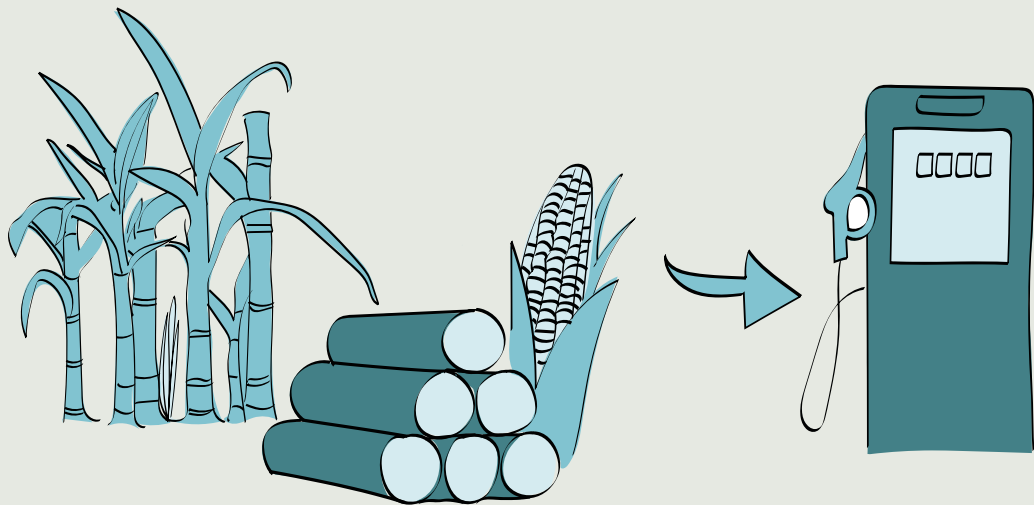
Também conhecida como energia das marés, é obtida a partir dos movimentos naturais de subida e descida do nível do mar. Turbinas instaladas em



barragens costeiras convertem a força da água em energia elétrica, durante o enchimento nas marés altas e a liberação nas marés baixas. Essa tecnologia já é utilizada em países como França e Coreia do Sul.

## Bioenergia

A bioenergia é produzida a partir de materiais orgânicos, como a cana-de-açúcar, e inclui biocombustíveis líquidos, gasosos e sólidos. É chamada de “bioenergia moderna” porque exclui o uso tradicional de biomassa, como madeira e carvão vegetal usados para cozinhar, que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente.



Embora seja importante para gerar eletricidade, a bioenergia também pode ser usada em setores difíceis de eletrificar, como aviação e transporte marítimo, além de ser uma alternativa para a transição energética no setor industrial, de transporte e edifícios, área que precisa de energia para construção, aquecimento, resfriamento, iluminação e funcionamento de equipamentos. No setor de transportes, por exemplo, os biocombustíveis podem acelerar a transição energética junto com a expansão de veículos elétricos.

De acordo com a IEA, a bioenergia moderna é mais acessível economicamente do que o hidrogênio e os e-combustíveis (combustíveis eletrônicos ou sintéticos), que utilizam carbono capturado na composição.

## A controvérsia do uso de usinas nucleares

O uso de energia nuclear como alternativa aos combustíveis fósseis é um tema polêmico que gera debates entre cientistas, gestores públicos e a sociedade civil. Essa fonte de energia tem alta capacidade de geração e é considerada limpa em relação às emissões de carbono. No entanto, apresenta custos elevados e envolve riscos significativos para o meio ambiente e a saúde humana.

Os desastres nucleares de Chernobyl (Ucrânia, 1986) e Fukushima (Japão, 2011) são os exemplos mais marcantes dos perigos associados à exploração desse tipo de energia. Esses eventos resultaram na destruição de ecossistemas, mortes, adoecimento de milhares de pessoas expostas à radiação e impactos sociais e econômicos profundos que perduram até hoje.



Obtida a partir da divisão de átomos de metais como urânio e plutônio, chamada de fissão nuclear, esse tipo de energia é usada principalmente para produzir eletricidade, o que é feito por meio de usinas term nucleares. Nessas usinas, reatores controlam a fissão de átomos, gerando calor e aquecendo água. Transformada em vapor, essa água movimentada as turbinas que criam eletricidade. Segundo a IEA, a energia nuclear é responsável por cerca de 10% da geração global de eletricidade. Em países desenvolvidos, esse percentual pode chegar a 20%. Entre os maiores produtores de energia nuclear estão Estados Unidos, China, França, Japão e Rússia. Além de perigosa, a energia de fissão nuclear custa mais caro do que renováveis como a eólica, a solar e a hidrelétrica. Também demanda mais tempo para ser implementada e depende de fontes (principalmente o urânio) que, apesar de abundantes, não são renováveis e um dia se extinguirão.

No caso brasileiro, as duas usinas nucleares em operação, Angra 1 e Angra 2, representam juntas pouco mais de 1% da eletricidade gerada e da capacidade instalada. Outra usina, Angra 3, está em construção desde 1984. Em 2018, o Instituto Escolhas publicou um estudo mostrando que interromper a construção de Angra 3 e desmontar o que já havia sido feito sairia mais barato do que terminar a obra e gerar eletricidade durante muitos anos.

O Observatório do Clima defende o encerramento, já em 2026, da geração nuclear, justificado pelos seus altos custos e riscos. O Brasil deve considerar como diretrizes o fechamento de Angra 1 em 2025, com o fim da licença operacional, assim como o fechamento de Angra 2 no mesmo ano, antes do encerramento de sua vida útil, com a rescisão do contrato de operação. Também devem ser levadas em conta a não criação de novas usinas nucleares e a não exploração de urânio, com prazo para descomissionamento de Caetité. A energia nuclear para a geração de eletricidade deve ser zerada, podendo ser considerada somente no meio militar para outros usos — por exemplo, em submarinos movidos por reator nuclear.

# A agropecuária



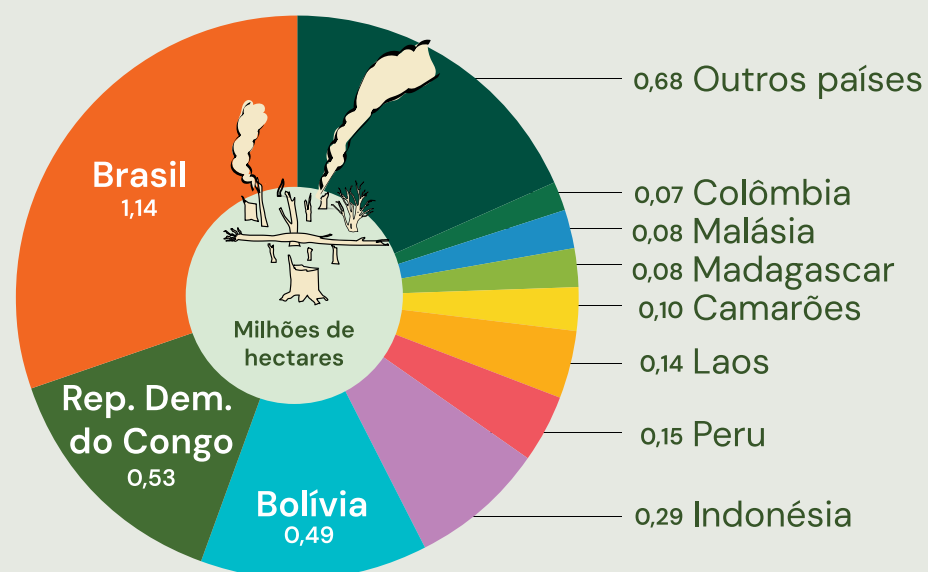


## O boi e a monocultura como vetores de poluição climática

Não é apenas embaixo da terra (onde estão – e precisam ficar – os fósseis) que se encontram as fontes do desequilíbrio climático global. Na superfície, os padrões de uso e ocupação territorial também desempenham papel decisivo nessa direção, tendo a agropecuária um lugar cativo entre os principais emissores de gases de efeitos estufa.

Estudos indicam que, quando considerado em conjunto com as chamadas mudanças no uso da terra (como desmatamento e queimadas), o segmento responde por cerca de 20% das emissões globais — no Brasil, esse percentual fica acima de 70%. Isso ocorre porque os sistemas de produção baseados em monoculturas extensivas e na abertura de pastagens para alimentar rebanhos têm seu modelo econômico fortemente amparado na abertura de novas áreas e no uso de queimadas como ferramenta de manejo.

### Países líderes na perda de florestas tropicais primárias em 2023



Observação: Florestas primárias são aquelas que permaneciam sem interferência humana até serem desmatadas.  
Fonte: Global Forest Watch/WRI

Essas atividades são emissoras de grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, principalmente, mas também de outros gases de efeito estufa, como o metano. Além disso, com a pecuária em larga escala, aumentam muito as emissões derivadas da fermentação entérica do rebanho bovino (o chamado “arroto” do boi).



Segundo levantamento anual da *Global Forest Watch*, 3,7 milhões de hectares de florestas tropicais foram derrubados no mundo em 2023, área quase do tamanho da Suíça e que equivale à destruição de 10 campos de futebol por minuto. O Brasil encabeça a lista de desmatadores, calculada em hectares derrubados, respondendo por 30% de toda a perda de florestas primárias nos trópicos, apesar da redução de 36% na derrubada em relação ao ano anterior.

Na sequência, vêm República Democrática do Congo, Bolívia, Indonésia e Peru. As altas taxas de supressão florestal globais seguem em um ritmo que levará ao não cumprimento da meta adotada na COP26, em Glasgow, que prevê zerar e reverter a perda de florestas até 2030.

Na República Democrática do Congo, a perda de floresta (o país tem segunda maior floresta tropical do mundo, que se mantém como o maior sumidouro de carbono do planeta) é motivada principalmente pela agricultura itinerante — a derrubada é seguida de queimadas e “limpeza” da terra para culturas de curto

prazo — e pela produção de carvão vegetal, a principal fonte de energia do país. Na Bolívia, a perda de floresta se deu majoritariamente por queimadas, a maioria delas induzida por humanos para implantação agrícola.

Já na Indonésia, as perdas florestais mais significativas foram induzidas pela abertura de plantações extensivas da indústria do papel e celulose, além de derrubadas em menor escala para expansão agrícola. No Peru, quinto do ranking, a agropecuária extensiva também aparece entre as principais causas da perda florestal.

Mas não são apenas os efeitos diretos desse modus operandi que deveriam causar preocupação. Em 2024, um artigo de revisão publicado na revista Science sintetizou o resultado de dezenas de estudos em uma conclusão bizarra: ao impulsionar as mudanças climáticas, a agricultura e a pecuária ajudam a construir um cenário no qual seus próprios impactos são intensificados.

As mudanças climáticas trarão tempos difíceis para o segmento agrícola, com redução da produtividade, secas e cheias fora do normal, aumento da erosão e da perda de nutrientes do solo e menos eficácia de agrotóxicos, além da expansão do alcance e resistência de pragas que atacam as lavouras.

Sem uma mudança para sistemas mais sustentáveis e resilientes de produção de alimentos, o resultado será uma adaptação na direção contrária à desejada, que deverá incluir ainda mais desmatamento e poluição química, além do uso cada vez mais intensivo de água via irrigação, entre outros componentes.

Submetidos ao aquecimento global (+1,5°C), os campos de produção de arroz passarão a emitir 23% a mais de metano na atmosfera, por exemplo. Aumentará, ainda, a poluição por amônia (NH<sub>3</sub>) e óxidos de nitrogênio a partir de fertilizantes e de metano pela gestão de esterco.

Especialistas apontam que a superação desse cenário depende da adoção de outro modelo de produção agropecuária. A agricultura familiar, com suas práticas tradicionais de cultivo e manejo do solo, precisa ser parte dessa solução, impulsionando a adoção de um modelo de baixo carbono e matriz agroecológica e com integração entre lavoura, floresta e pecuária.

## Os principais impactos ambientais dos sistemas agrícolas

E os efeitos potencialmente agravantes das mudanças climáticas



\*nitrogênio e fósforo

Fonte: Estudo publicado na revista Science. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture

Há ainda a necessidade de investimentos globais em pesquisa e adaptação para baratear, democratizar e universalizar práticas agrícolas sustentáveis, superando barreiras socioeconômicas e as diferenças regionais.



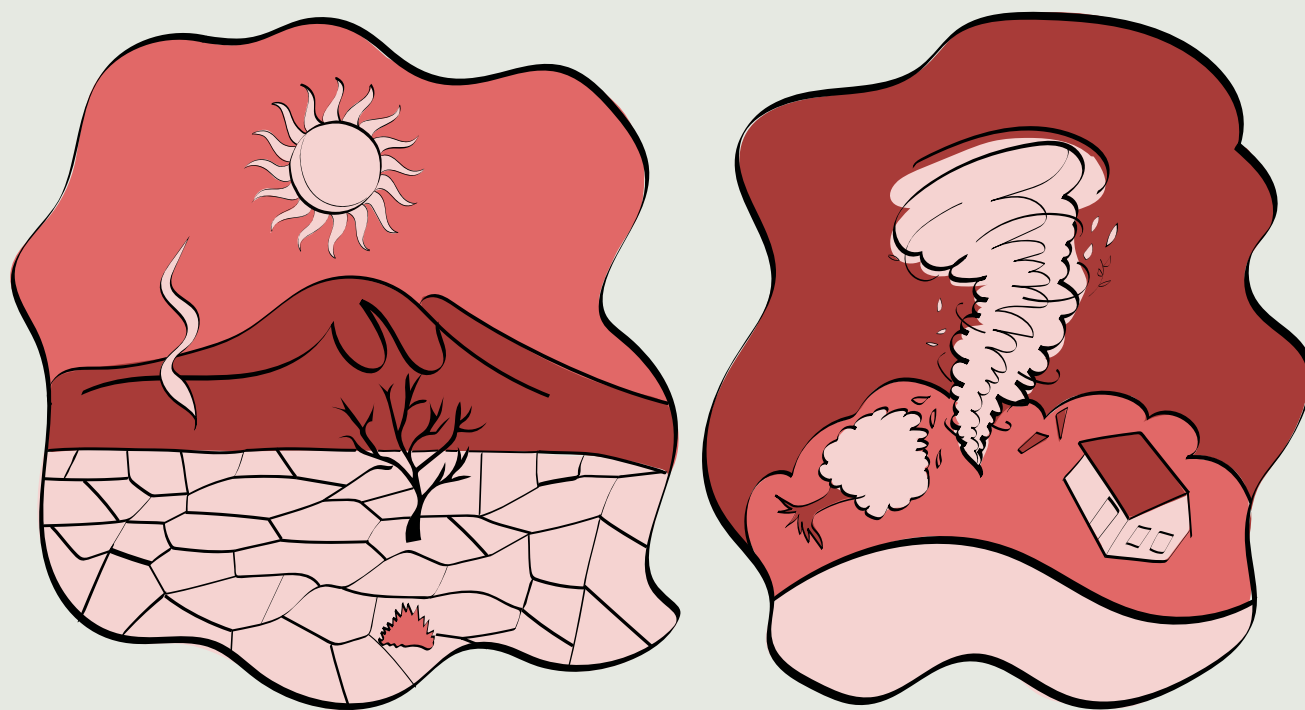
O clima que  
não queremos





## Entenda os efeitos do aquecimento 1,5 °C e além

Em 2023 e 2024, a humanidade teve o primeiro encontro com um aquecimento global de 1,5°C, o limite proposto pelo Acordo de Paris. Não foi nada bonito. O biênio mais quente desde o início dos registros globais de temperatura, em 1880, testemunhou uma sucessão estonteante de catástrofes climáticas: os piores incêndios da história no Canadá; um recorde de redução de gelo marinho na Antártida; 13 mil mortos por uma única tempestade na Líbia; três megaenchentes num espaço de oito meses no Rio Grande do Sul, inclusive a pior já vista no estado e a maior em área alagada registrada no Brasil, em maio de 2024; a pior seca em 70 anos de registro histórico, que cobriu as capitais brasileiras de fumaça; duas megaestiações consecutivas na Amazônia e uma no Pantanal; deslizamentos de terra mortíferos no litoral paulista; calor de 48°C na Europa; centenas de mortes por chuvas extremas na Polônia, no Quênia, no Afeganistão, no Paquistão e na Espanha; quatro tufões simultâneos nas Filipinas; centenas de mortos por um furacão nos Estados Unidos. Nenhum recanto da Terra foi poupado de eventos extremos, e isso pode ser apenas o começo.



O ano de 2024 foi o primeiro a registrar, todos os meses, temperaturas médias globais maiores que 1,5°C acima da era pré-industrial.

Segundo o IPCC, o painel do clima da ONU, quase metade da população mundial já vive hoje sob risco climático e enfrentando algum tipo de escassez de água. Embora não exista dose segura de aquecimento global, esses riscos serão potencializados com cada décimo de grau Celsius de aquecimento da superfície terrestre. Mesmo limitado a 1.5°C, teremos impactos irreversíveis, mas haverá contenção da intensificação, diminuindo as chances de outros efeitos extremamente perigosos. Quanto maior o aquecimento, maior é a importância e o impacto causado por cada décimo.

Neste capítulo, você vai entender os principais impactos da mudança do clima e vai saber o que aguarda a humanidade no futuro se tudo der certo no combate às emissões de gases de efeito estufa — e se tudo der errado.

A chave para a compreensão desses impactos, mais uma vez, é a física. Mais especificamente, um número: 3°C. Esta é a chamada “sensibilidade climática em equilíbrio”, a estimativa do quanto a temperatura média da Terra subiria caso a concentração de gases de efeito estufa dobrasse em relação à era pré-industrial (1850-1900). Os cenários de aquecimento global olham para esse parâmetro e o comparam às emissões observadas e a várias hipóteses sobre as emissões do futuro. A partir daí, modelos computacionais tentam prever como o sistema climático vai se comportar a diferentes graus de aquecimento. Essas simulações carregam um grau enorme de incerteza, e modelos diferentes enxergam o mundo de formas ligeiramente distintas. É por isso que o IPCC usa 23 modelos climáticos diferentes em seus relatórios, e a maioria deles converge no essencial — a saber, o melhor é não deixar as temperaturas saírem de controle.

## O mundo é uma chaleira

Os efeitos da mudança do clima derivam do fato de que a relação entre a atmosfera e os oceanos é perturbada à medida que a temperatura sobe. O aquecimento significa mais evaporação na superfície do mar e, portanto, mais vapor d'água (ele próprio um potente gás de efeito estufa) e energia disponível, bem

como modifica a capacidade de retenção de umidade pela atmosfera: ela consegue carregar aproximadamente 7% a mais de vapor d'água com 1°C de aquecimento médio da superfície global. Dessa forma, temos uma maior provisão de umidade para tempestades e ciclones e se aumenta o potencial para eventos extremos de precipitação, visto que as tempestades têm condições favoráveis para se tornarem maiores e mais intensas.

As mudanças climáticas também agravam a escassez de água em regiões predispostas. Temperaturas mais altas aumentam a evaporação do solo e, estando a atmosfera mais sedenta, ela extrai a umidade com mais eficiência, podendo usá-la como combustível para extremos de chuva. Com mudanças nos fluxos de umidade atmosférica e alteração na distribuição da precipitação, temos intensificação de eventos de chuva e seca e esse contraste pode ser amplificado tanto entre regiões quanto entre períodos mais secos e úmidos do ano, com oscilações potencializadas. Isso vale para tempestades, para megaestragens e também, por paradoxal que pareça, para nevascas: com mais umidade na atmosfera, nos lugares onde chove, chove mais, e onde neva, neva mais; embora a tendência seja de menos ondas de frio à medida que o planeta esquenta, todos os extremos ficam amplificados.

12c

## Corrida de furacão

Katrina, Rita, Irma, Maria, Haiyan, Nargis, Harvey, Idai. Várias das tempestades tropicais mais destrutivas e mortais já registradas na história humana aconteceram neste século. A classificação dos ciclones tropicais depende de sua intensidade e localização. Os menos intensos são chamados de depressões tropicais e, caso seus ventos máximos sustentados cheguem a 63 km/h, passam a ser chamados de tempestades tropicais. Se chegarem a 119 km/h ou mais, os ciclones tropicais recebem nomes conforme sua localização de origem: furacões (no Atlântico, na região central e nordeste do Pacífico), tufões (na região noroeste do Pacífico) ou são chamados apenas de ciclones, independente de sua intensidade (no Oceano Índico e sul do Pacífico).

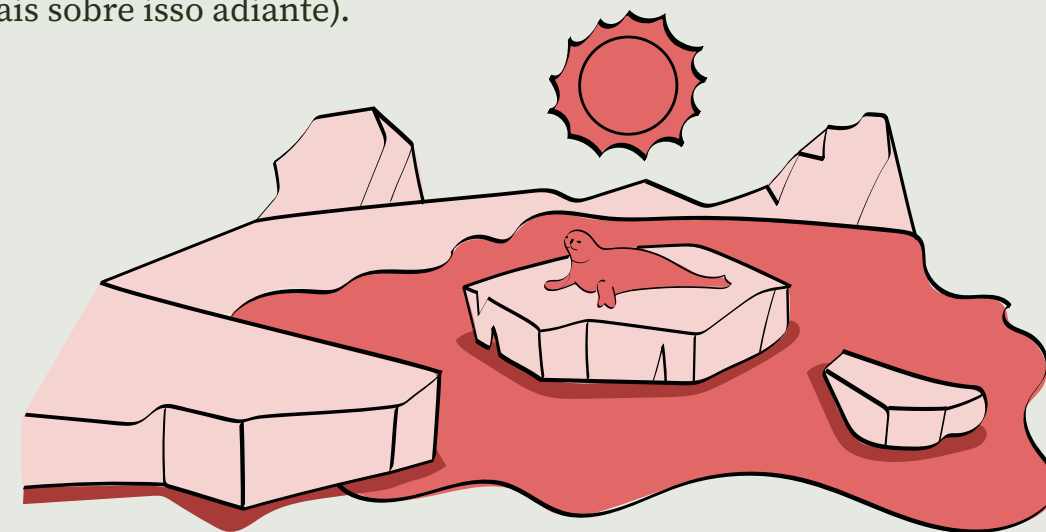
Embora não haja evidências significativas de que os ciclones tropicais estejam ficando mais frequentes globalmente e no longo prazo por conta da mudança do

clima, é provável que a proporção dos mais intensos (de categorias 3, 4 e 5 na escala Saffir-Simpson, que mede sua intensidade) e a frequência de eventos de rápida intensificação tenham aumentado globalmente nos últimos 40 anos, segundo o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC.

Entretanto, com a compreensão dos princípios físicos das mudanças climáticas antropogênicas, a confiança de que eles se tornarão mais intensos no futuro é bem maior e os modelos climáticos são consistentes nas projeções: é muito provável que a proporção de ciclones tropicais de categorias 4-5 aumente globalmente com o aquecimento.

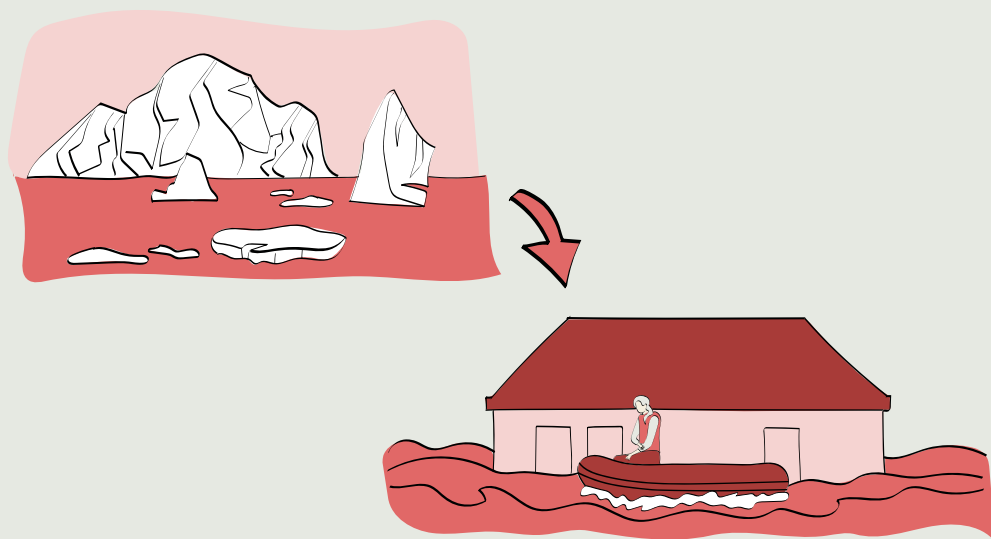
O calor adicional tem, ainda, um efeito duplo sobre o nível dos oceanos. Com 1 bilhão de pessoas vivendo a até 10 km da costa no mundo todo, muitas em metrópoles litorâneas como Rio de Janeiro, Xangai, Nova York, Lagos e Dacca, e com pequenas nações insulares erguidas sobre atóis de baixa altitude, como Kiribati, Tuvalu e Nauru, a elevação global do nível do mar é um dos impactos mais temidos da mudança do clima. Ela acontece por três razões: primeiro, pela expansão térmica do oceano à medida que ele esquenta. Quem já viu água ferver numa panela sabe que, como ocorre com qualquer fluido, quanto mais quente, mais volume ela ocupa. Hoje, a expansão térmica contribui com 50% do aumento observado no nível do mar, que foi de 20 cm no mundo todo de 1901 a 2018, segundo o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC.

O segundo fator é o derretimento dos grandes mantos de gelo da Groenlândia e da Antártida, que juntos armazenam 90% da água doce do planeta. Somente o oeste antártico tem o potencial de elevar os oceanos em mais de 10 metros caso derreta completamente, e há indícios fortes de que esse colapso já tenha começado e seja irreversível (mais sobre isso adiante).



A Groenlândia já foi responsável por outros 10 metros de elevação do nível do mar 125 mil anos atrás, quando seu gelo praticamente sumiu, e nas últimas duas décadas é a maior contribuinte individual para esse aumento, mesmo com um aquecimento global menor que 1,5 °C. Juntas, hoje, Groenlândia e Antártida respondem por 20% da elevação do mar. Outros 22% vêm do derretimento de geleiras de montanha, como os Andes, os Alpes e o Himalaia. Um terceiro fator, com 8% do total observado, é a mudança na armazenagem de água nos continentes, com mais água sendo retirada de aquíferos para consumo humano e lançada no mar.

A depender do cenário de emissões nas próximas décadas, o nível do mar no final do século pode ser de 50 cm a 1 metro mais alto do que no começo do século passado. Parece pouco, mas o principal efeito do aumento do nível do mar se dá durante a maré alta, quando a área alagada aumenta, e em ressacas, que ficam mais frequentes: com 1 metro de elevação do mar, uma onda de 2 metros numa ressaca dobra de tamanho.



A média também esconde variações regionais, que podem ser muito maiores — em especial em lugares como Nova York, onde o terreno naturalmente está afundando. Com 15 cm de aumento de nível do mar em 2100 em relação a 2020, a população exposta a enchentes litorâneas que ocorreriam uma vez a cada cem anos aumentaria 20%; com cerca de 1 m de nível do mar aumentado, ela duplicaria. Ilhas do Pacífico com altitudes máximas de 10 metros tendem a perder território já neste século. Mas, como a subida do nível do mar é um evento de início lento, ela continua acontecendo no futuro: segundo o IPCC, no ano 2300 ela pode passar

de 7 metros e não é possível descartar elevações de 15 metros, em ambos os casos forçando um redesenho radical do litoral no mundo todo.

12d

## Peste, fome, guerra, morte: os quatro cavaleiros do apocalipse climático

O secretário-geral da ONU, António Guterres, chamou os dados do IPCC sobre o futuro climático da Terra de “atlas do sofrimento humano”. Quando o painel divulgou a síntese do seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6), destacou que a temperatura da superfície global havia aumentado 1,1°C de 2011 a 2020 em comparação com o período pré-industrial (1850-1900). Esse aumento foi mais rápido desde 1970 do que em qualquer outro período de 50 anos. O limite de 1,5 °C poderia ser ultrapassado permanentemente em qualquer momento entre 2020 e 2040. A depender do cenário de emissão, o aquecimento da Terra em 2100 em relação à era pré-industrial poderia ser de 1,4 °C, na melhor hipótese, a 4,4 °C, na pior. Embora o Acordo de Paris tenha provavelmente tirado o planeta da trajetória de 4,4 °C, que é o que se veria na ausência de medidas de mitigação, mesmo com as metas dos países a Terra ainda rumava, na terceira década do século 21, para quase 3 °C de aquecimento no fim deste século.

Os efeitos da crise do clima podem ser agrupados em quatro grandes categorias, uma para cada cavaleiro do Apocalipse. A primeira são os efeitos para a saúde humana (Peste), principalmente devido ao aumento e o agravamento das ondas de calor. Quanto mais quente a temperatura média, mais episódios de calor extremo durante vários dias seguidos serão observados (em 2023, o Brasil teve nove ondas de calor). Hoje, ondas de calor que aconteceriam uma vez a cada 50 anos na ausência de influência humana já são 4,8 vezes mais comuns e 1,2°C mais quentes; com 1,5 °C, elas devem se tornar 8,6 vezes mais comuns e 2 °C mais quentes; com 4 °C de aquecimento global, elas ficariam 39 vezes mais comuns e 5,3 °C mais quentes, o que tornaria áreas do mundo como a Amazônia e a Península Arábica essencialmente inabitáveis. Segundo um estudo, o calor excessivo já suprimiu 5% de crescimento do PIB per capita do Brasil e de outros países tropicais, contra apenas 1% de nações frias ou temperadas como o Canadá e a Finlândia.



# MORRENDO DE CALOR: A TEMPERATURA DE BULBO ÚMIDO

Além de afetar a produtividade, o aprendizado e aumentar o risco de morte em crianças e idosos, o calor excessivo provoca o risco de morte por estresse térmico em adultos saudáveis em alguns lugares devido ao aumento da chamada temperatura de bulbo úmido, conhecida pela sigla WBT. Trata-se da combinação de temperatura e umidade do ar. Em situações de aquecimento e umidade elevados, se dificulta a dissipação de calor pelo suor e o organismo pode entrar em colapso. Alguns estudos apontam que o limite de sobrevivência humana é um WBT de 35 °C (um calor de 40 °C com 75% de umidade relativa do ar, por exemplo, é uma das diversas combinações possíveis para se chegar a este cenário). Também há estudos que apontam que nem sempre é necessário se chegar a uma temperatura de bulbo úmido de 35 °C, visto que, a depender das condições, temperaturas mais baixas já podem causar mortes.

Há poucos registros recentes de que esse patamar tenha sido atingido, mas ele pode se tornar comum na Amazônia e no Golfo Pérsico, por exemplo, no final do século.

Ruim para os humanos, excelente para alguns insetos como o *Aedes aegypti* e outros transmissores de doenças que se reproduzem mais e ficam mais ativos com temperaturas mais altas. A combinação de mais calor ao longo do ano e urbanização ruim já fez o habitat do mosquito da dengue se expandir em regiões como o Brasil. Segundo o IPCC, doenças transmitidas por insetos, pela água e pela comida, como cólera e verminoses, se ampliam em todos os cenários de aquecimento global. “Em particular, o risco de dengue aumentará, com temporadas [de contágio] mais longas e maior distribuição geográfica na Ásia, Europa e Américas Central e do Sul, além da África Subsaariana, potencialmente pondo em risco bilhões de pessoas a mais no fim do século”, afirma o IPCC.



O segundo cavaleiro do apocalipse climático é a fome. A agricultura é provavelmente a atividade humana mais dependente de um clima previsível — e ela só pôde se desenvolver nos últimos 10 mil anos por causa da estabilidade climática do Holoceno, o período geológico no qual vivemos. Nas últimas décadas, secas e tempestades vêm colocando safras em risco no mundo todo, e eventos extremos como os incêndios na Rússia em 2010 e no Brasil em 2024 elevam o preço da comida, aumentando o número de pessoas em insegurança alimentar. Segundo o IPCC, secas em regiões semiáridas que normalmente seriam vistas uma vez a cada dez anos hoje já são quase duas vezes mais comuns. Com 4 °C, elas seriam quatro vezes mais frequentes, basicamente acontecendo de dois em dois anos.

O efeito é devastador não apenas para zonas semiáridas (algumas, como o Nordeste brasileiro, fortemente dependentes da agricultura familiar, mais vulnerável), mas também para regiões de fronteira agrícola, como o Centro-Oeste e o sul da Amazônia. Um estudo da ecóloga Ludmila Rattis, do Ipam, mostrou em 2021 que 28% da região produtora de grãos do Cerrado e da Amazônia já está fora das condições climáticas para a qual as sementes de soja e milho plantadas ali foram desenvolvidas, nos anos 1970. No fim do século, esse índice pode chegar a 74%, forçando a adaptação da agricultura ao seu limite. Também tiveram forte componente climático os choques dos preços do azeite de oliva em 2023 e do café e cacau em 2024. No Brasil, segundo o estudo Brasil 2040, da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, a área de cultivo de soja pode cair 39% nos próximos 15 anos; o feijão, arroz e milho safrinha podem ter redução de área cultivável de 26%, 24% e 28%, respectivamente.





No caso da cana-de-açúcar, as áreas cultiváveis podem aumentar, por ser um gênero que precisa de calor, em especial para a produção de etanol. Porém, o cultivo deve migrar para regiões que hoje são mais frias. A produção de mandioca deve sair do Nordeste, muito seco, e migrar para áreas de Cerrado e Amazônia. O caupi, ou feijão-de-corda, já está migrando do Nordeste para o Centro-Oeste.

Com cerca de 2°C de aquecimento, a disponibilidade de alimentos e a qualidade da dieta podem agravar doenças relacionadas à nutrição e aumentar o número de pessoas desnutridas, especialmente na África Subsaariana, Sul da Ásia e América Central. Isso já é realidade hoje: a mudança do clima retardou ganhos de produtividade da agricultura mundial nos últimos 50 anos e a desnutrição já aumentou, afetando sobretudo mulheres, crianças, idosos e indígenas.

O americano David Wallace-Wells, no livro *A Terra Inabitável* (2019), escreveu que, para cada grau de aquecimento global, a produção de cereais declina 10%. O CO<sub>2</sub> adicional no ar poderia ajudar a equilibrar esse declínio, já que em tese é um

alimento para as plantas. Só que a fertilização de CO<sub>2</sub> aumenta a quantidade de carboidratos fixados pelas plantas e reduz a de outros nutrientes, como proteínas. Isso já está acontecendo com o arroz, base da dieta de pelo menos 2 bilhões de pessoas no mundo. O chamado “colapso de nutrientes” ameaça causar deficiência proteica em 150 milhões de pessoas apenas no mundo desenvolvido até 2050; no Sul Global esse índice será muito maior.

A guerra é o terceiro cavaleiro do apocalipse climático. O risco de conflito aumenta sobretudo por secas que empurram populações e países inteiros para a sede e a insegurança alimentar (Somália e Darfur são exemplos), mas também por excesso de calor e outros riscos múltiplos que podem levar a migrações em massa.

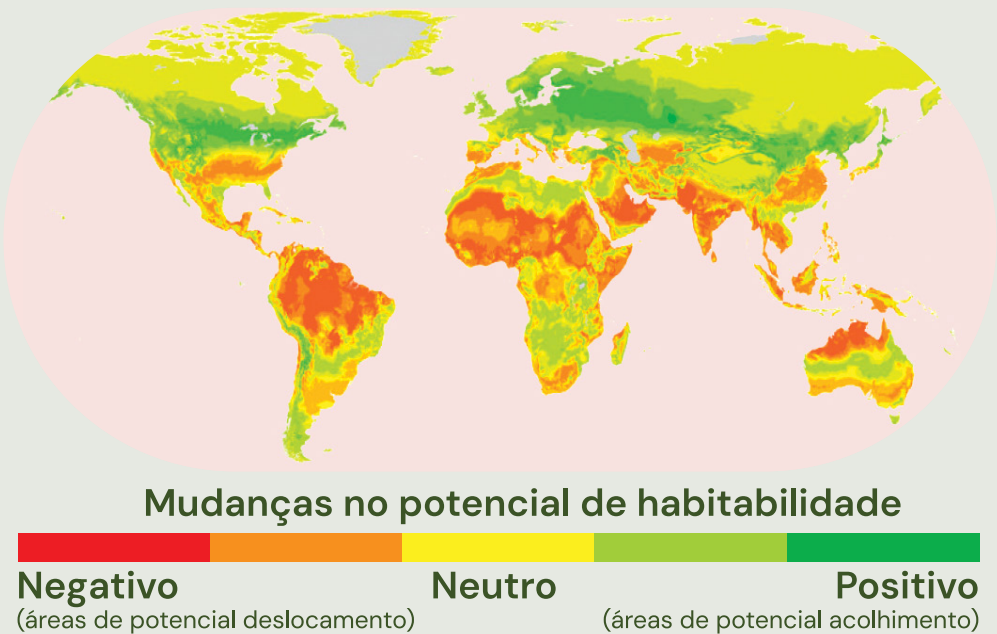


Segundo o IPCC, com 2 °C a água de degelo que hoje alimenta bacias hidrográficas no mundo inteiro deve diminuir 20% e a massa de geleiras deve cair 18%, reduzindo a quantidade de água para a agricultura, a geração de energia e o abastecimento humano. Nas regiões litorâneas e nações insulares, os aquíferos estão ameaçados por intrusão de água salgada do mar. Tal qual ocorreu na Síria na década passada e no Nordeste do Brasil ao longo do século 20, a seca, e seu impacto na produção de alimentos e na saúde, é um fator de risco migratório que pode causar instabilidade política. Hoje, 90 milhões dos 120 milhões de migrantes forçados do mundo vivem em países fortemente expostos a desastres climáticos. Migrantes, seja dentro ou fora das fronteiras de um país, raramente são bem recebidos na sua chegada, e pressionam empregos e infraestrutura no seu destino. Um dos efeitos da guerra civil síria foi o fluxo de 1 milhão de sírios para a Europa, o que aguçou a xenofobia dos eleitores europeus e facilitou a ascensão da extrema-direita no continente.

Quanto mais o aquecimento da Terra se afasta de 1,5 °C, maior é o risco de que várias regiões dos trópicos sejam empurradas para além do limite da tolerância humana. Segundo o IPCC, nossa espécie evoluiu em climas amenos, com médias de 11°C a 15 °C no ano. Até os anos 1990, menos de 1% da população mundial habitava regiões com médias anuais acima de 29 °C, que um estudo considerou o limite da tolerância. Hoje já são 600 milhões. Caso o aquecimento global ultrapasse 2,7 °C, que é o que acontecerá caso as metas nacionais atuais sejam cumpridas sem aumento de ambição, um terço da população mundial estará além do limite de tolerância humana no fim do século, o que só pode resultar em três coisas: morte, doença ou migração. O mapa a seguir mostra as regiões do planeta que deverão virar “fonte” de movimentos migratórios e as que terão climas propícios a receber imigrantes.

O mapa é um retrato de tensões geopolíticas prontas para acontecer, já que as migrações em geral ocorrerão das zonas mais vulneráveis dos países mais pobres para as zonas mais ricas do mundo. Esta é uma das razões pelas quais o Departamento de Defesa dos Estados Unidos considerava (antes do segundo mandato de Donald Trump) a crise climática um problema de segurança nacional.

### Deslocamento geográfico projetado



Observação: O mapa representa a distribuição relativa da população humana em uma situação hipotética, na qual os seres humanos estariam distribuídos de acordo com a temperatura  
Fonte: Estudo publicado na revista PNAS. Future of the human climate niche

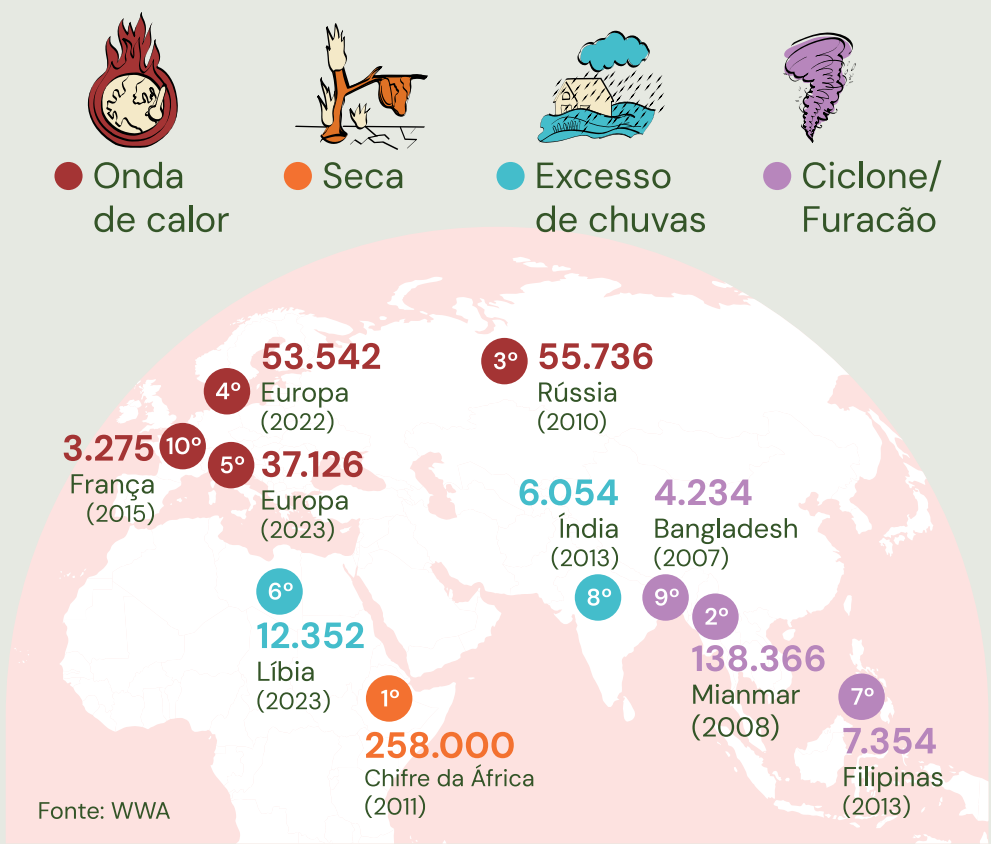
O último cavaleiro, que evidentemente tem relação com os outros dois, é a morte. Um único evento extremo em 2003, a grande onda de calor da Europa, matou 70 mil pessoas num continente pego de surpresa. Cinco anos depois, o ciclone Nargis, em Mianmar, ceifou o dobro de vidas: 138 mil. Somente os dez extremos climáticos mais mortais de 2004 a 2023 causaram pelo menos 570 mil mortes, segundo a WWA (Rede Mundial de Atribuição). O número é subestimado, principalmente devido à dificuldade em contabilizar óbitos relacionados ao calor.

Essas mortes têm, como afirma a pesquisadora do IPCC Patrícia Pinho, “raça, gênero e geografia” preferenciais. Segundo o painel do clima, o número de mortes nas regiões mais vulneráveis na última década foi 15 vezes maior do que nas zonas mais abastadas do mundo. E, mesmo em lugares como a Europa, a maior parte das vítimas se concentra nos extremos de faixa etária e na base da pirâmide de rendimentos. A diferença de vulnerabilidade escancara um fato essencial sobre a crise do clima: as pessoas que menos contribuíram para o problema são as que mais sofrem e sofrerão.

As mortes do clima não são apenas humanas, claro. A mudança climática está agravando a sexta onda de extinção de espécies no mundo todo e, neste caso, os ecossistemas mais vulneráveis também são as primeiras vítimas. Ondas de calor marinhas cada vez mais frequentes, intensas e disseminadas estão causando mortalidade em massa de recifes de coral no mundo inteiro. As altas temperaturas da água fazem as colônias de coral perderem as algas que lhes dão cor e que garantem a alimentação dos corais. Sem elas, o coral fica branco e pode morrer. De 2014 a 2016, um episódio severo de branqueamento atingiu o maior banco de corais do mundo, a Grande Barreira australiana. O governo da Austrália estima que 30% dos recifes tenham morrido apenas nesse evento.

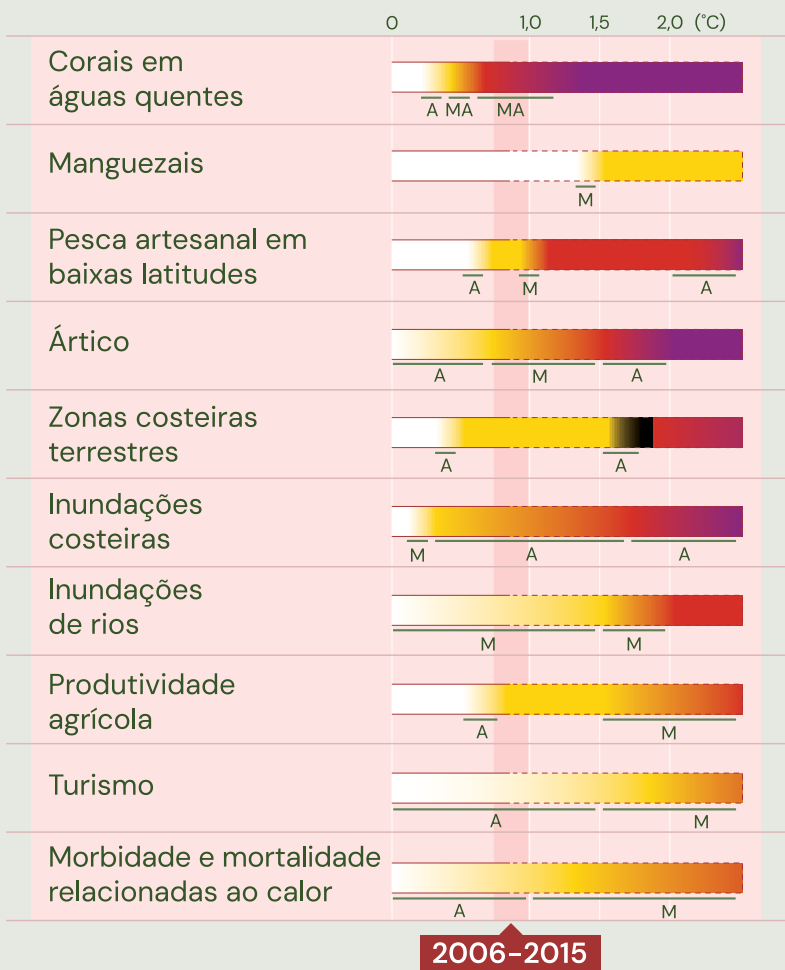
Os recifes de coral tropicais, berçários de vida marinha dos quais dependem milhões de pessoas em todo o mundo, serão provavelmente o primeiro grande ecossistema a desaparecer com a mudança climática. Seu limite de adaptação já foi cruzado quando a Terra esquentou 1°C; o limiar de 1,5°C do Acordo de Paris não os põe a salvo. Mas evitar que o aquecimento global ultrapasse 2 °C ainda pode poupar milhões de espécies em todo o mundo. Segundo o IPCC, nos ecossistemas terrestres, de 3% a 14% das espécies provavelmente entrarão em risco muito alto de extinção com 1,5 °C, chegando a 18% com 2 °C, 29% com 3°C e 39% com 4 °C.

Os 10 eventos climáticos extremos mais mortais  
Número de mortos de 2004 a 2024



Impactos e riscos em diferentes sistemas naturais, controlados e sociais

Variação da temperatura média global da superfície em relação aos níveis pré-industriais (°C)



Nível de confiança  
B = Baixo    M = Médio    A = Alto    MA = Muito alto



- 1 Nenhum impacto detectável atribuído às mudanças climáticas
- 2 Impactos ou riscos detectáveis e atribuíveis às mudanças climáticas, com pelo menos confiança média.
- 3 Impactos ou riscos severos e generalizados.
- 4 Riscos muito altos, com irreversibilidade ou pouca adaptação possível

Fonte: relatório SR15 do IPCC

PRECISAMOS FALAR SOBRE “OVERSHOOT”

Mesmo que a humanidade consiga implementar com sucesso o Acordo de Paris e evitar os piores efeitos da mudança do clima, durante várias décadas esta geração e as próximas precisarão conviver com um aquecimento maior do que 1,5 °C. Esse período, chamado de “overshoot”, corresponde ao tempo em que as temperaturas ficarão acima do limite de Paris somente por força do carbono que nós já lançamos e lançaremos nos próximos anos antes de zerar emissões líquidas em 2050 (se tudo der absolutamente certo). O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC mostrou que em todos os cenários de emissões a temperatura global ultrapassará 1,5 °C nos próximos 20 anos, e em apenas um deles ela voltará a ficar abaixo desse limite neste século (1,4 °C, mais precisamente).

Mesmo que temporário, o overshoot, diz o IPCC, resultaria em “impactos severos e frequentemente irreversíveis” – em ecossistemas, abastecimento de água, segurança alimentar e energia. Por exemplo, geleiras pequenas em cordilheiras como os Andes, os Alpes e o Himalaia desapareceriam quase ou completamente, colocando em risco o suprimento de água de populações que dependem delas. Alguns ecossistemas seriam empurrados para além de sua capacidade de regeneração, como os recifes de coral em grande parte do mundo, florestas de sargaços, manguezais e marismas.

“Em cidades, o número de pessoas expostas a secas e enchentes muito provavelmente mais do que dobraria entre 2000 e 2030, com 350 milhões de pessoas a mais expostas a escassez hídrica devido a secas com 1,5 °C de aquecimento”, diz o relatório, que prossegue: “Muitos impactos de trajetórias de overshoot seriam irreversíveis numa escala de séculos a milênios”. Entre eles estão a possibilidade de derretimento de geleiras e solos congelados (permafrost) e a perda de habitats costeiros.





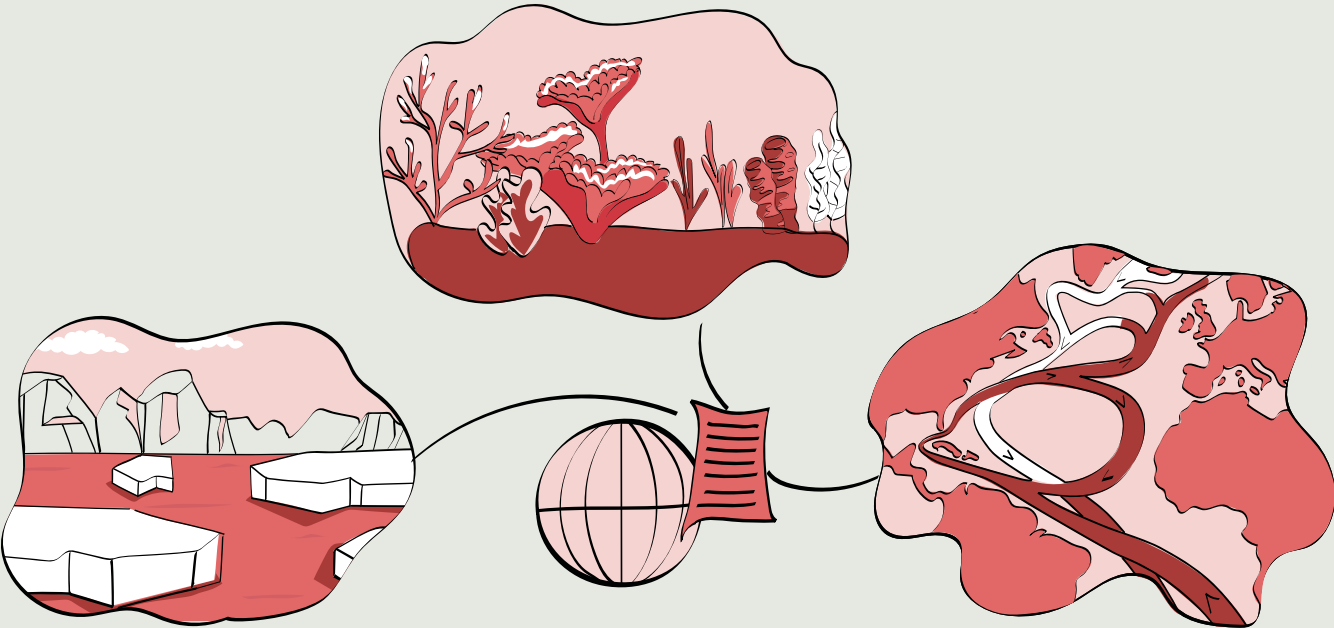


O pior cenário

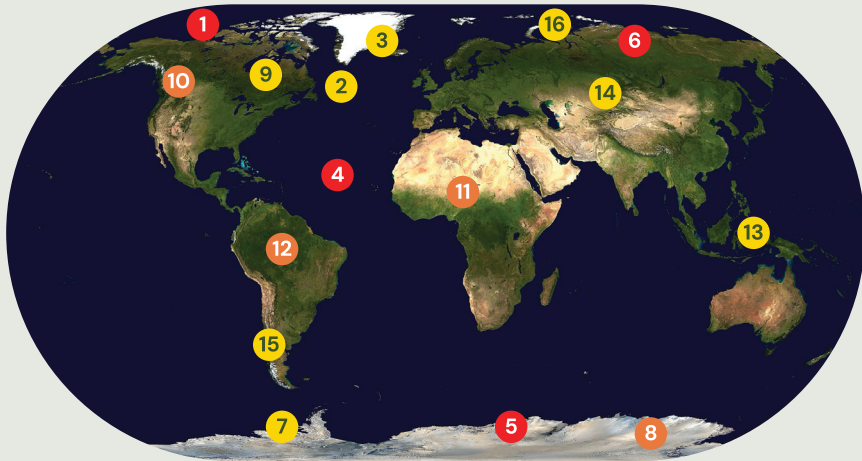
# Os pontos de virada do clima

À medida que o aquecimento global se intensifica, aumentam os riscos de os sistemas climáticos atingirem pontos de não-retorno (*tipping points*), alterações que são difíceis ou até impossíveis de reverter. O alerta vem sendo feito por cientistas há anos, e o IPCC, inclusive, aponta com alta confiança que o aquecimento causará mudanças abruptas. Embora algumas consequências ainda sejam incertas, os riscos são alarmantes, pois cada ponto de não-retorno pode desencadear um “efeito dominó” em outros sistemas climáticos.

Um relatório global sobre tipping points, publicado em 2023 com o apoio de 200 pesquisadores de mais de 26 países, identificou mais de 25 pontos de não-retorno. Destes, cinco grandes sistemas já estão em risco de cruzar a inflexão no nível atual de aquecimento global: os mantos de gelo da Groenlândia e da Antártida Ocidental, o permafrost (solo permanentemente congelado no Ártico), os recifes de coral de água quente e a circulação termohalina do Atlântico Norte (que inclui a chamada Corrente do Golfo, que leva calor à Europa).



## Principais pontos de não-retorno



Pontos de inflexão que podem ocorrer devido ao aquecimento global  
● <2°C    ● 2-4°C    ● ≥4°C

|    |                                                      |                     |
|----|------------------------------------------------------|---------------------|
| 1  | Gelo marinho do Ártico no inverno                    | Colapso             |
| 2  | Giro subpolar do Mar de Labrador                     | Colapso             |
| 3  | Calota de gelo da Groenlândia                        | Colapso             |
| 4  | Circulação Meridional do Atlântico                   | Colapso             |
| 5  | Calota de gelo da Antártica Oriental                 | Colapso             |
| 6  | Permafrost boreal                                    | Colapso             |
| 7  | Calota de gelo da Antártica Ocidental                | Colapso             |
| 8  | Bacias subglaciais da Antártica Oriental             | Colapso             |
| 9  | Permafrost boreal                                    | Degelo abrupto      |
| 10 | Floresta boreal                                      | Avanço para o norte |
| 11 | Reverdecimento do Sahel / monção da África Ocidental | Intensificação      |
| 12 | Floresta Amazônica                                   | Morte               |
| 13 | Recifes de corais em baixas latitudes                | Morte em massa      |
| 14 | Floresta boreal                                      | Morte ao sul        |
| 15 | Geleiras de montanha                                 | Perda               |
| 16 | Gelo do Mar de Barents no inverno                    | Perda abrupta       |

Fonte: Relatório Global Tipping Points e Agência Espacial Europeia

Para explicar o “efeito dominó” de um ponto de não-retorno, tomemos como exemplo o derretimento dos mantos gelo da Groenlândia e da Antártida Ocidental, que armazenam a maior parte da água doce do planeta. Esse degelo pode elevar o nível global do mar em pelo menos 10 metros. A diminuição de áreas congeladas gera um feedback positivo, ou seja, uma amplificação da mudança inicial — neste caso, mais derretimento — que, por sua vez, retroalimenta o aquecimento global.

Um dos principais feedbacks é o efeito de albedo: quando a camada de gelo (área branca) diminui, a capacidade de refletir a energia solar (albedo) também diminui. Isso faz com que mais energia solar seja absorvida, aumentando a temperatura do planeta e acelerando ainda mais o derretimento.

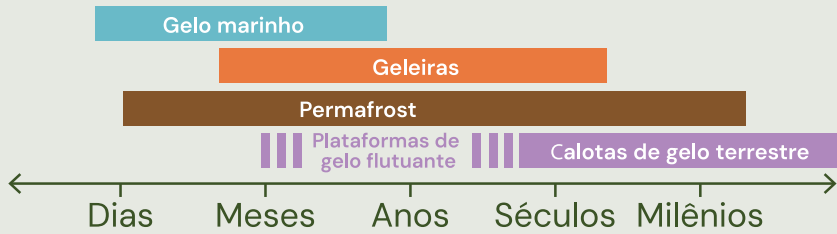
Além disso, há evidências de que o aquecimento global antropogênico vem enfraquecendo a Circulação/Célula de Revolvimento Meridional do Atlântico (AMOC, na sigla em inglês), que leva calor para o Atlântico Norte, sendo importante na redistribuição de energia, no transporte de nutrientes e influenciando o clima global. E isso vem acontecendo provavelmente devido ao maior aporte de água doce proveniente da precipitação, do derretimento do gelo marinho e da camada de gelo da Groenlândia, bem como por mudanças na circulação oceânica, promovendo alterações na salinidade e prejudicando a circulação termohalina. Diversas linhas de evidência mostram um enfraquecimento da AMOC desde o início ou meados do século 20 e vários estudos analisam quão próximos estamos de uma possível total parada ou colapso, ou seja, de seu ponto de inflexão.

Algumas pesquisas também sugerem que o enfraquecimento e colapso da AMOC podem induzir mudanças na variabilidade do El Niño Oscilação Sul (ENOS), um fenômeno natural e cíclico com grande influência no clima, que contribui para redução ou aumento das chuvas em diversas regiões do mundo. Tanto a AMOC quanto o ENOS têm impacto no clima da floresta amazônica, que também tem seu ponto de inflexão. Contudo, ainda há incertezas sobre o papel do enfraquecimento da AMOC no processo de morte da floresta.

Impactos biofísicos dos pontos de não-retorno na criosfera



O diagrama mostra os tempos aproximados das mudanças nos respectivos sistemas/áreas



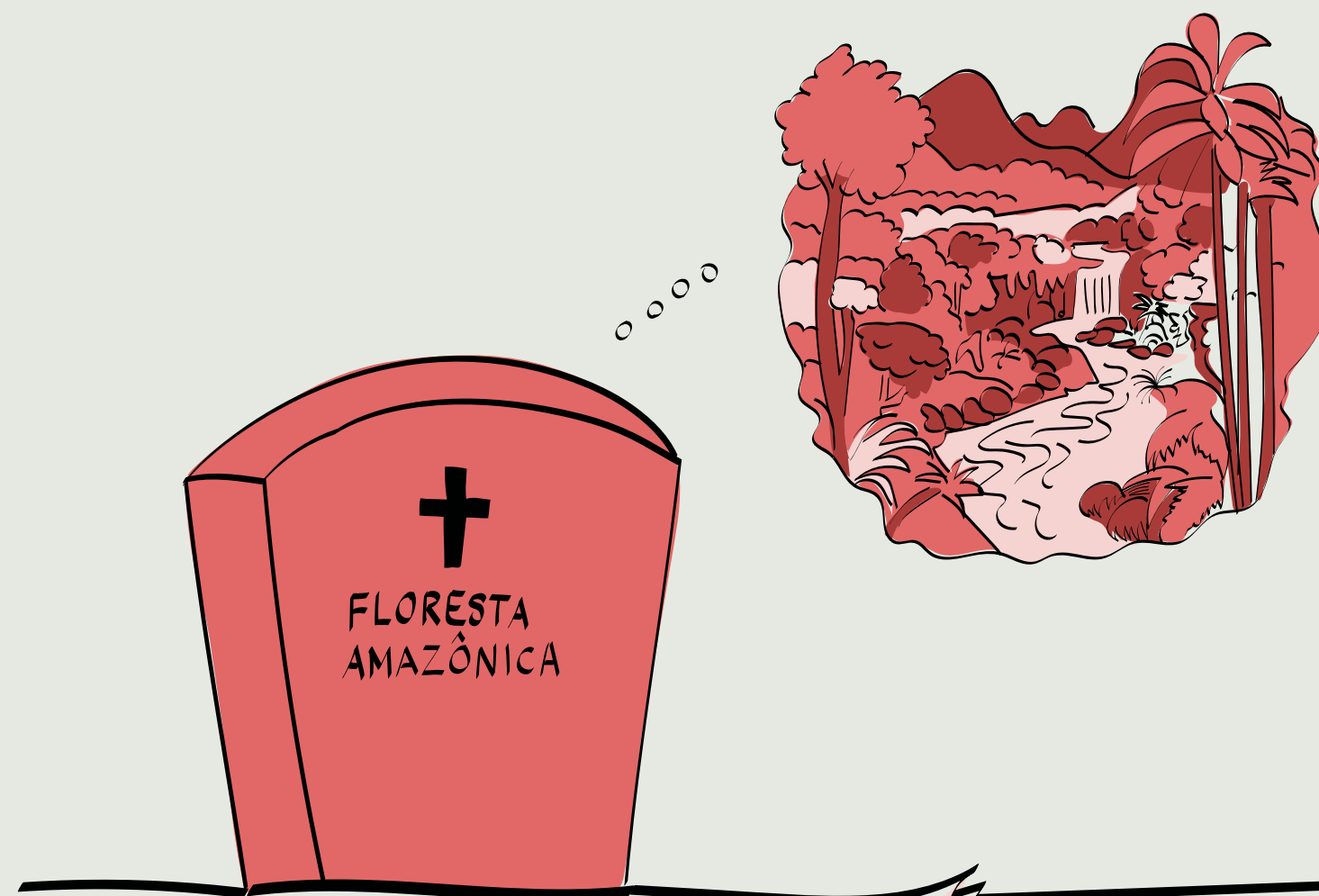
Fonte: Relatório Global Tipping Points / AMAP



A floresta amazônica desempenha um papel essencial na regulação do clima, não apenas no Brasil, mas globalmente. O ecossistema equilibra o ciclo de chuvas, estabiliza temperaturas, absorve grandes quantidades de carbono e armazena cerca de 150 a 200 bilhões de toneladas de gás carbônico equivalente em forma de carbono na biomassa. Pesquisas indicam que o desmatamento e as queimadas causadas por atividades humanas, somados aos impactos das mudanças climáticas, podem levar a Amazônia ao ponto de não-retorno. Esse processo, chamado de “dieback” (morte), transformaria a floresta em uma savana empobrecida.

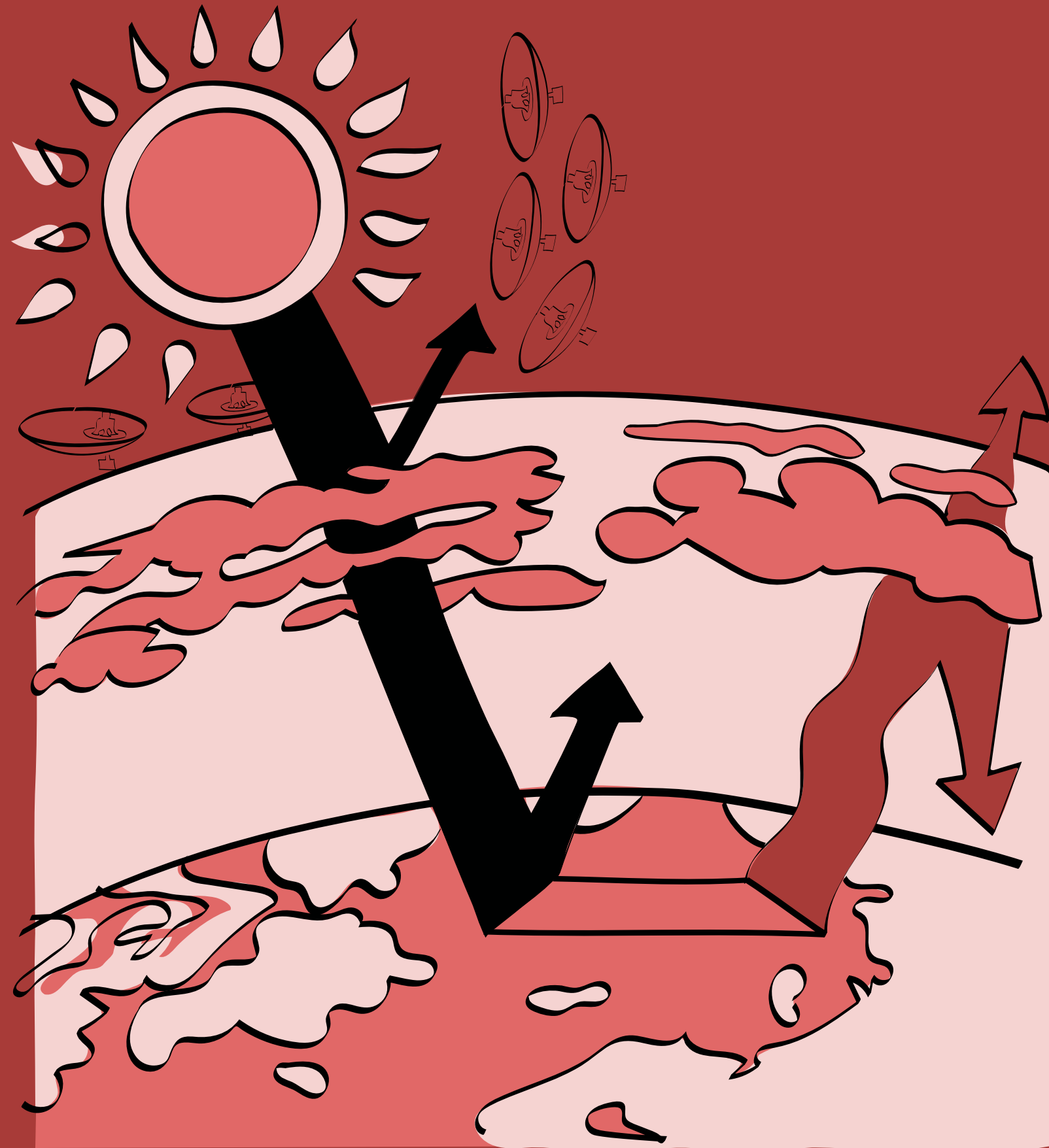
Há diversas projeções sobre a Amazônia. Uma projeção de 2016 indica que a morte generalizada da floresta pode ocorrer com um aquecimento de 3 a 4 °C ou com cerca de 40% de desmatamento, mas interações sinérgicas incertas podem reduzir esse limite de desmatamento para 20% a 25%. Outros modelos projetam um colapso com aquecimento de 2,5 °C a 6,2 °C. Um estudo publicado em 2022 apontou o ponto de não-retorno em um limiar de aproximadamente 3,5 °C, independentemente do desmatamento, mas provavelmente com um aumento de temperatura menor quando há desmatamento.

Embora ainda existam incertezas sobre qual aumento de temperatura pode causar a morte da floresta, já há evidências de que a Amazônia está sob crescente pressão. Um exemplo disso são as intensas queimadas, favorecidas pela seca intensificada pelas mudanças climáticas. Um estudo liderado por pesquisadores brasileiros e publicado em 2024 sugere que, até 2050, entre 10% e 47% da floresta estarão expostas a perturbações que podem rapidamente desencadear o seu colapso. A morte da Amazônia causará impactos locais, regionais e globais.





# A geoengenharia

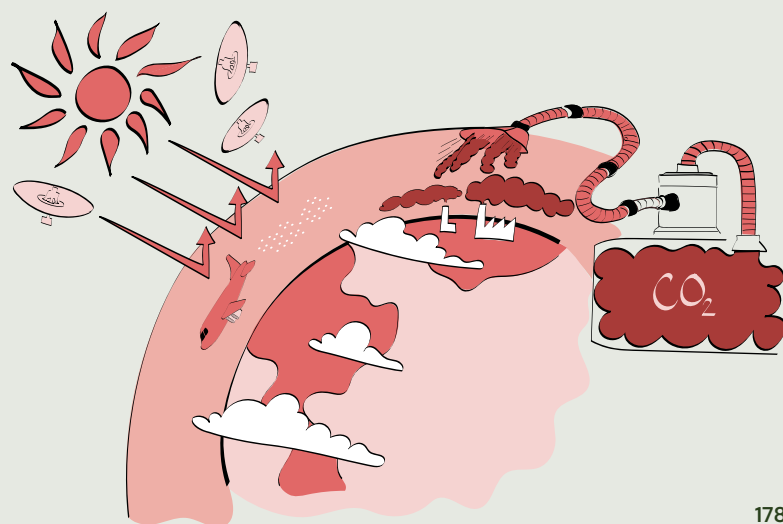


## O risco da demora e de criar mais problemas

A geoengenharia — também chamada de engenharia climática ou intervenção climática — tem sido estudada desde os anos 1970 com o objetivo de modificar o sistema climático em escala global ou regional para minimizar os impactos causados pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. No entanto, algumas técnicas são controversas entre os cientistas devido aos riscos envolvidos, como no caso da interferência na radiação solar.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) divide a geoengenharia em duas categorias principais: remoção de dióxido de carbono (CDR, na sigla em inglês) e modificação da radiação solar (SRM, na sigla em inglês). Além dessas, há outras abordagens em estudo, como a conservação do manto de gelo por meio de uma barreira subaquática e a restauração do gelo marinho e do permafrost. Essas técnicas são para retardar o derretimento das calotas polares, que ajudam a manter o planeta mais frio ao refletirem a luz solar, e do permafrost, solo permanentemente congelado que armazena grandes quantidades de carbono e pode liberar CO<sub>2</sub> e metano ao descongelar.

Segundo a União Geofísica Americana (AGU, na sigla em inglês), as técnicas de remoção de carbono da atmosfera estão entre as mais desenvolvidas. No entanto, especialistas apontam que mesmo os métodos considerados mais eficazes podem levar décadas para remover parcial ou totalmente as emissões de CO<sub>2</sub> geradas pela atividade humana, além de terem custos elevados.



Já a modificação da radiação solar (SRM), também chamada de geoengenharia solar, ainda não dispõe de tecnologia pronta para implementação e pode trazer impactos negativos, como alterações nos padrões de chuva em algumas regiões. De acordo com a AGU, tanto as técnicas de CDR quanto as de SRM, assim como outras formas de geoengenharia, apresentam tanto oportunidades quanto riscos. Por isso, requerem regulamentação e governança em níveis local, regional e global. A seguir, as principais categorias.

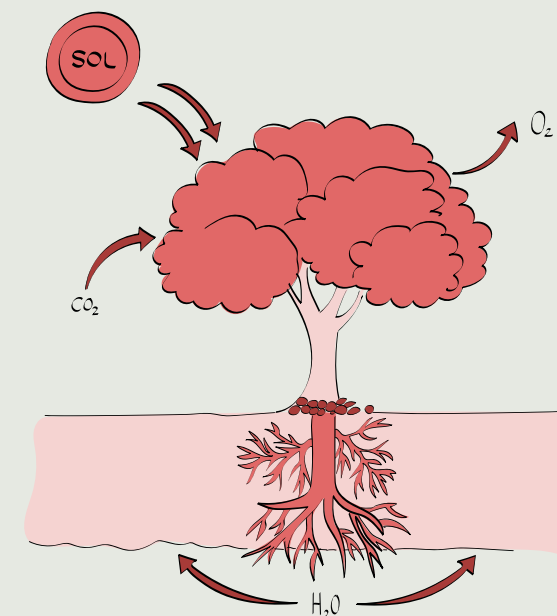
## Remoção de dióxido de carbono (CDR)

A CDR engloba métodos que removem CO<sub>2</sub> da atmosfera e o armazenam de forma durável em reservatórios geológicos, terrestres ou oceânicos, ou ainda em produtos. Segundo o IPCC, a remoção de carbono será necessária para atingir emissões líquidas zero, compensando emissões difíceis de eliminar. No entanto, o relatório destaca que a redução direta das emissões pode ser alcançada mais rapidamente, enquanto a CDR exige um alto investimento inicial e tempo para gerar impacto.

Entre os principais métodos de remoção de CO<sub>2</sub> estão:

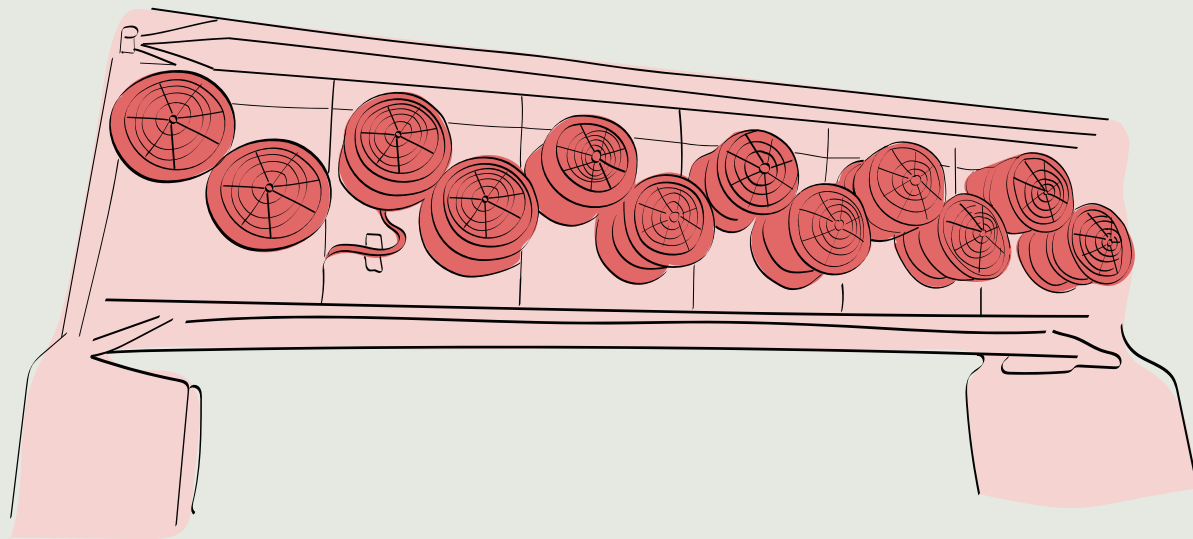
### Soluções baseadas na natureza:

- **Reflorestamento e florestamento:** plantio de árvores, inclusive em áreas onde nunca houve cobertura florestal.
- **Proteção e manejo sustentável de florestas** (lembre-se que as árvores absorvem CO<sub>2</sub> durante o processo de fotossíntese).
- **Agricultura regenerativa:** manutenção do carbono no solo por meio de técnicas como plantio direto e cobertura com palhada.



## Técnicas industriais e químicas:

- **Biochar:** aquecimento de biomassa em ambiente com pouco oxigênio para transformá-la em carvão vegetal, usado na agricultura e no tratamento de água. Esse processo impede a liberação de CO<sub>2</sub> pela decomposição da biomassa.
- **Bioenergia com captura e armazenamento de carbono** (BECCS, em inglês): captura e armazenamento do CO<sub>2</sub> durante a queima da biomassa.
- **Captura direta de carbono do ar com armazenamento** (DACCS, em inglês): uso de máquinas para filtrar o CO<sub>2</sub> diretamente da atmosfera e armazená-lo em reservatórios geológicos ou usá-lo em produtos industriais. Apesar de estar em crescimento, a tecnologia ainda enfrenta desafios de custo e escala.
- **Intemperismo acelerado de rochas:** técnica para aumentar a absorção de CO<sub>2</sub> pelas rochas.



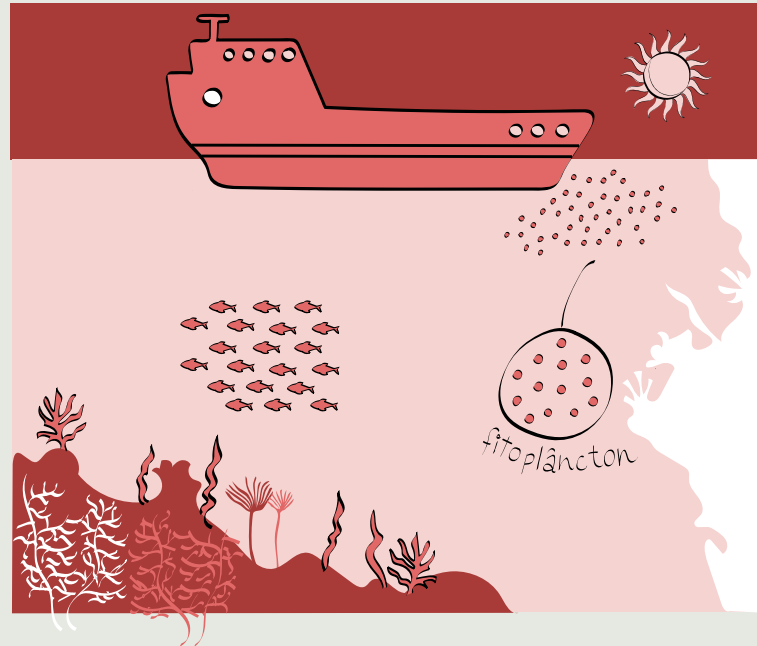
## CCS E CCU SÃO TÉCNICAS DE GEOENGENHARIA?

Para o IPCC, a captura e o armazenamento de carbono (CCS, em inglês) e a captura e utilização de carbono (CCU, em inglês) não são consideradas técnicas de remoção quando aplicadas ao CO<sub>2</sub> de origem fóssil. “O CCS e o CCU só podem ser classificados como métodos de CDR se o CO<sub>2</sub> for biogênico ou capturado diretamente do ar e armazenado de forma durável em reservatórios geológicos ou produtos”, aponta o Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC.

Empresas de petróleo e gás têm investido nessas tecnologias, mas elas só ajudam a reduzir as emissões diretas das operações (escopo 1, como a produção e o refino do petróleo) e indiretas (escopo 2, como consumo de energia nas atividades). No entanto, cerca de 80% das emissões do setor vêm do uso dos combustíveis fósseis. Isso significa que, mesmo que as emissões operacionais (escopos 1 e 2) sejam eliminadas, o impacto climático continuará intenso se o consumo de petróleo, gás e carvão não for reduzido.

### Soluções oceânicas:

- **Restauração de turfeiras e zonas úmidas:** reservatórios naturais de carbono.
- **Gestão do carbono azul:** conservação e restauração de ecossistemas costeiros, como manguezais e pradarias marinhas, que capturam e armazenam grandes quantidades de carbono.
- **Aumento da alcalinidade dos oceanos:** processo para neutralizar a acidificação e elevar a capacidade de absorção de  $\text{CO}_2$ .
- **Fertilização dos oceanos:** estímulo ao crescimento de fitoplâncton (microalgas) para promover a absorção de carbono por meio da fotossíntese.



14c

## Geoengenharia solar

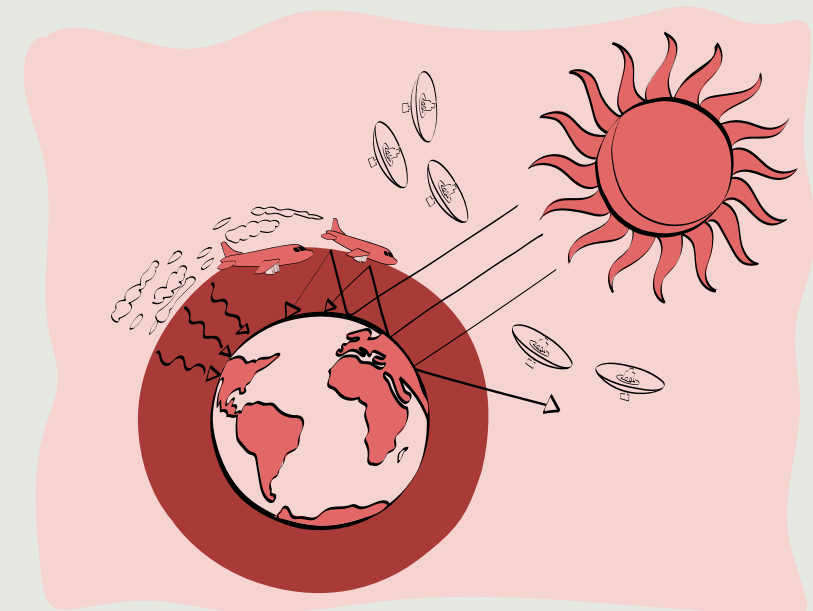
A modificação da radiação solar (SRM, na sigla em inglês), também chamada de geoengenharia solar, tem como objetivo reduzir a quantidade de radiação solar absorvida pela Terra para amenizar o aquecimento global causado por atividades humanas. No entanto, ainda são necessários avanços nas pesquisas e no desenvolvimento tecnológico para viabilizar sua aplicação.

Segundo a União Geofísica Americana (AGU), os métodos de geoengenharia solar mais pesquisados atualmente são:

- **Injeção de aerossóis estratosféricos (SAI, na sigla em inglês):** liberação de partículas de sulfato na estratosfera para refletir parte da luz solar e reduzir o aquecimento global.
- **Clareamento de nuvens marinhas:** pulverização de gotículas de água salgada na atmosfera para aumentar a refletividade das nuvens oceânicas e diminuir a absorção de calor.

Outras técnicas em estudo incluem:

- **Aumento do albedo terrestre:** alteração da superfície terrestre, como clareamento de telhados para que mais radiação solar volte ao espaço.
- **Modificação do albedo oceânico:** aplicação de espuma ou bolhas na superfície do mar para aumentar a capacidade de refletir a luz solar.
- **Redução da cobertura de cirros:** dispersão dessas nuvens de alta altitude, que aprisionam calor na atmosfera, para diminuir o impacto delas no efeito estufa.
- **Guarda-sóis e refletores espaciais:** instalação de estruturas no espaço para bloquear ou desviar parte da radiação solar antes que atinja a Terra.





Há hipóteses de que a geoengenharia solar poderia resfriar o planeta, mas o IPCC alerta, no Sexto Relatório de Avaliação, que há um amplo consenso científico de que o SRM pode ser, no máximo, um complemento na estratégia contra as mudanças climáticas. “O SRM contrasta com as atividades de mitigação das mudanças climáticas, como redução de emissões e CDR [remoção de carbono], pois atua como uma ‘máscara’ para o problema, alterando o balanço de radiação da Terra em vez de enfrentar a causa raiz, que é o aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera”, afirma o IPCC.

Outro desafio é a necessidade de manutenção contínua dessas técnicas. Por exemplo, os aerossóis injetados na estratosfera têm vida útil de um a três anos, exigindo reaplicação frequente. No caso do clareamento de nuvens marinhas, os aerossóis de sal marinho permanecem na atmosfera por apenas cerca de 10 dias. Por outro lado, o dióxido de carbono emitido pelas atividades humanas pode permanecer na atmosfera por milhares de anos, o que torna a geoengenharia solar uma solução temporária e arriscada.

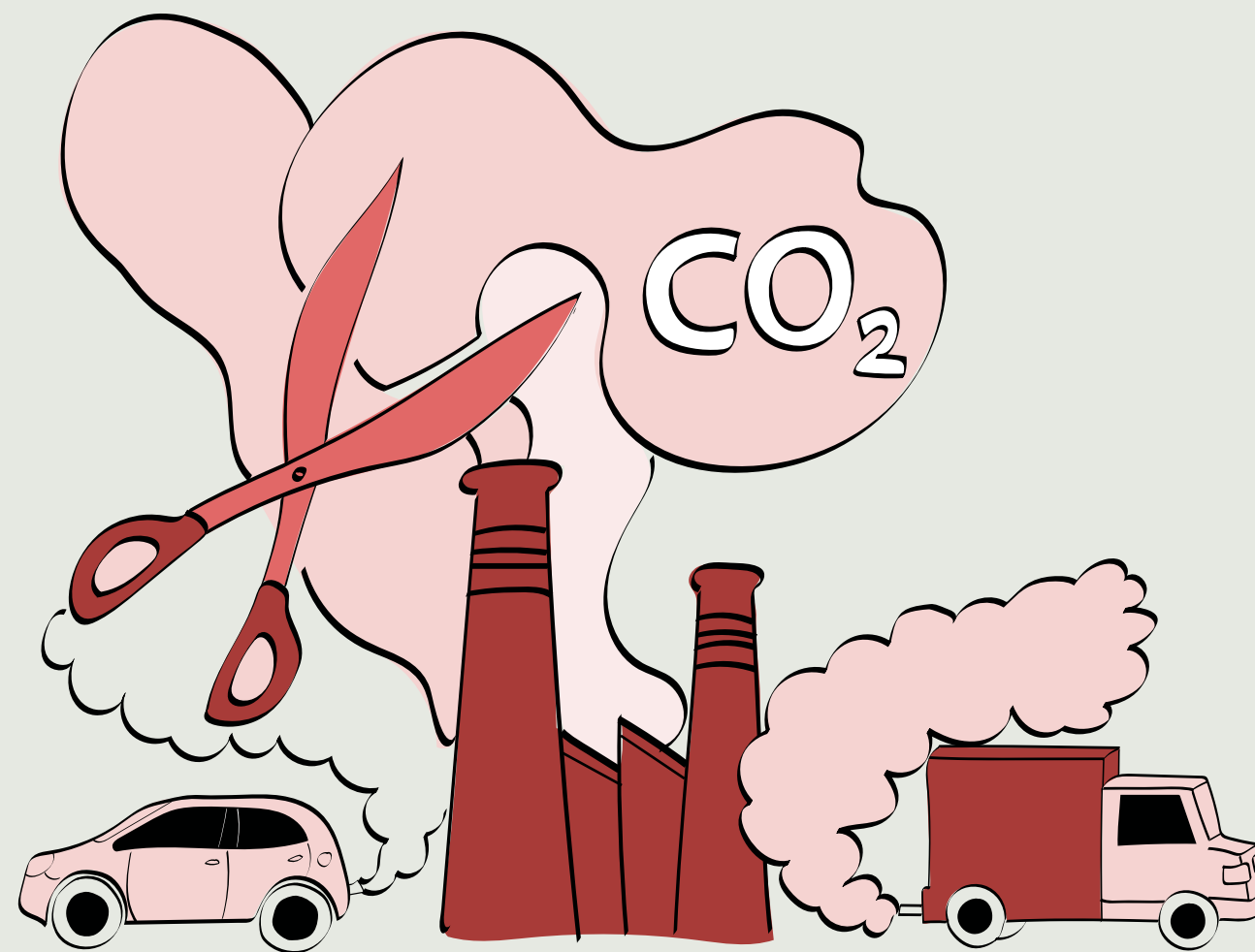
Além das limitações tecnológicas, a geoengenharia solar traz riscos significativos. O climatologista Alan Robock, que pesquisa sobre mudanças climáticas desde os anos 1970, publicou um artigo que identifica seis benefícios e 28 riscos associados à implementação dessas técnicas. Os impactos negativos foram divididos em seis áreas, incluindo exemplos como:

- **Sistema climático, biológico e físico:** mudanças nos padrões de chuva, risco de secas em algumas regiões e aumento da chuva ácida.
- **Saúde humana:** possível elevação nos casos de queimaduras solares devido à alteração da camada de ozônio.
- **Estética:** modificação da aparência do céu, tornando-o esbranquiçado.
- **Riscos desconhecidos:** consequências imprevistas devido a erros humanos durante a implementação.
- **Governança:** conflitos entre países e possível controle comercial da tecnologia.
- **Ética:** uso militar da geoengenharia solar.

O próprio IPCC também alerta para os riscos. Por exemplo, o uso de aerossóis de sulfato para modificar a radiação solar pode comprometer a camada de ozônio, elevando o risco de câncer de pele. Além disso, a governança global dessas tecnologias já enfrenta desafios, mesmo na fase de pesquisa.

Em 2021, o Conselho de Saami (povo indígena do norte da Europa) e organizações ambientais suecas pressionaram a Universidade Harvard para suspender um experimento que testaria a injeção de aerossóis estratosféricos em Kiruna, na Suécia. O grupo alegou que a comunidade Saami e a sociedade sueca não haviam sido consultadas e que havia preocupações com os impactos ambientais e políticos da pesquisa.

Em 2024, durante a Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente, realizada em Nairóbi, no Quênia, os países não chegaram a um consenso sobre a regulação internacional da geoengenharia solar, refletindo os desafios políticos e éticos relacionados ao tema.



© 2025 Observatório do Clima – Licença CC BY-ND

|                                                                                      |                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Coordenação:<br>Claudio Angelo<br>Joana Amaral<br>Lorena Pontes<br>Priscila Pacheco  | Ilustrações e diagramação:<br>Natasha Gompers                                                                                 |
| Texto:<br>Claudio Angelo<br>Priscila Pacheco<br>Leila Salim<br>Rodrigo Vargas        | Mapa:<br>Natasha Gompers<br>Roberto Kaz                                                                                       |
| Edição:<br>Claudio Angelo<br>Felipe Werneck                                          | Gráficos:<br>Mario Kanno                                                                                                      |
|                                                                                      | Agradecimentos:<br>Cintya Feitosa<br>Tatiana Lobão                                                                            |
| Revisão técnica e científica:<br>Karina Bruno Lima<br>Fábio Ishisaki<br>Suely Araújo | Realização:<br> OBSERVATÓRIO<br>DO CLIMA |

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Eunice [livro eletrônico] : um guia ilustrado sobre a crise climática / Claudio Angelo...[et al.]; coordenação Joana Amaral, Lorena Pontes, Priscila Pacheco; ilustrações e diagramações Natasha Gompers. -- Piracicaba, SP: Laboratório do Observatório do Clima (LABOC), 2025.  
PDF

Outros autores: Priscila Pacheco, Leila Salim, Rodrigo Vargas.

ISBN 978-65-998407-9-1

1. Economia 2. Emissões de gases efeito estufa  
3. Mudanças climáticas 4. Natureza - Conservação  
5. Petróleo 6. Política ambiental I. Angelo, Claudio.  
II. Pacheco, Priscila. III. Salim, Leila. IV. Vargas,  
Rodrigo. V. Amaral, Joana. VI. Pontes, Lorena.  
VII. Pacheco, Priscila. VIII. Gompers, Natasha.

Índices para catálogo sistemático:  
1. Mudanças climáticas : Efeitos sociais 304.25  
Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

