

# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

O clima pode ser definido como uma média meteorológica e é descrito em termos da média e da variabilidade das características relevantes — como temperatura, precipitação e vento — ao longo de um período de tempo que varia desde meses a milhares (ou mesmo milhões) de anos. O clima reflete o modo como se comporta a meteorologia no longo prazo e, como tal, deve ser distinguido do *tempo*, que é uma condição meteorológica particular vivenciada diariamente, caracterizada por precipitação, temperatura, vento e assim por diante.

As condições meteorológicas, como a temperatura média anual na superfície da Terra, mudam ao longo do tempo. Pequenas mudanças nessas condições podem resultar em eras glaciais ou períodos quentes. Ao longo do século passado, observou-se um aumento da temperatura média da superfície da Terra de aproximadamente 0,76°C.

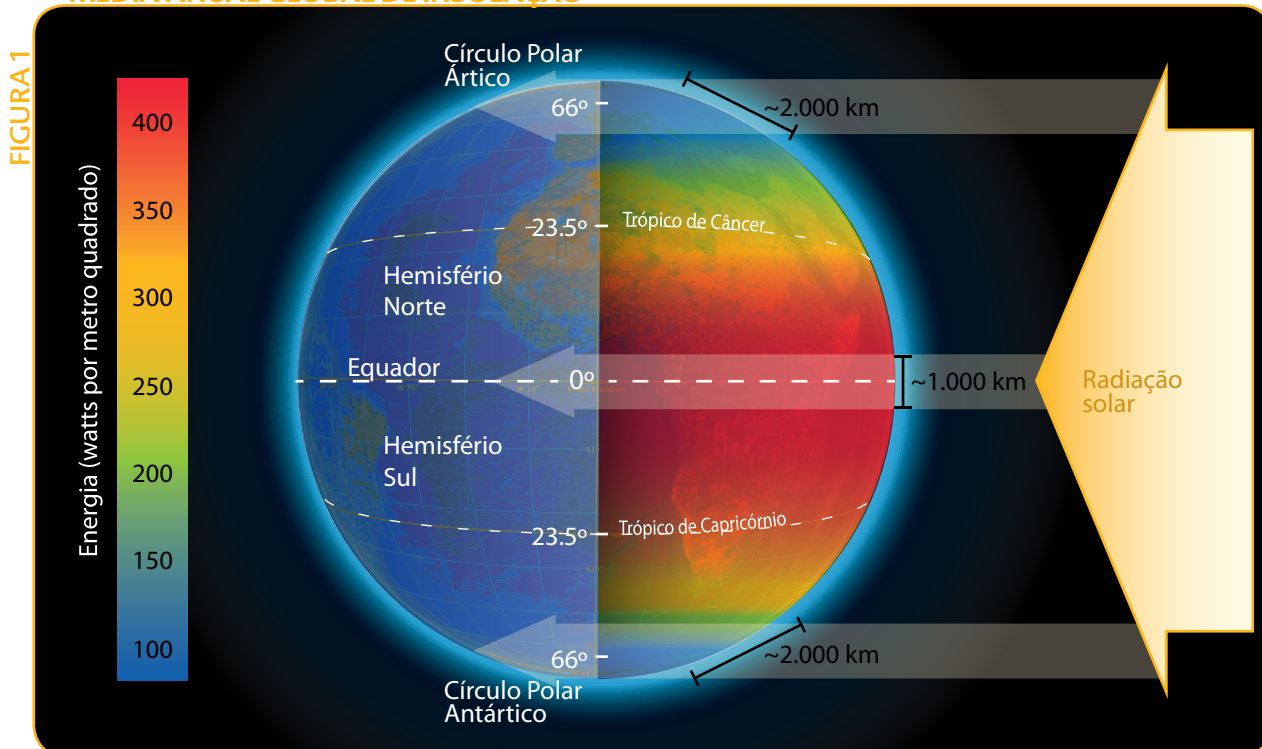
Há vários fatores naturais que podem influenciar o clima, como mudanças na órbita da Terra em torno do Sol, erupções vulcânicas ou mesmo períodos de aumento ou diminuição da atividade solar. No entanto, a tendência de aquecimento atual que vivenciamos tem sido associada principalmente ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) que retêm o calor na atmosfera, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

O Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC na sigla em inglês) de 2013 confirma que o aquecimento do clima global é inequívoco, muito provavelmente associado às atividades humanas (também conhecidas como atividades antrópicas) e tem aumentado desde o início da era industrial (cerca de 1750). Essas atividades incluem, entre outras, a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), a derrubada de florestas e práticas agrícolas que levam ao aumento da concentração de GEE na atmosfera.

Os impactos do aquecimento global hoje já são aparentes no derretimento de geleiras, no aumento da frequência de eventos climáticos extremos — como secas, ciclones ou chuvas torrenciais —, no aumento do nível do mar e em mudanças no crescimento vegetal que afetam a agricultura e a produção de alimentos. A expectativa é que essas e outras mudanças observadas se intensifiquem e causem um impacto significativo sobre as sociedades humanas e o meio ambiente em todo o mundo, especialmente se não houver esforços drásticos para reduzir as emissões de GEE na atmosfera.

Este capítulo explica os componentes do sistema climático, descreve os fatores subjacentes da mudança climática observada e, para concluir, apresenta os impactos da mudança climática que podem ser observados hoje.

### MÉDIA ANUAL GLOBAL DE INSOLAÇÃO



# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

### 1.1 O que é clima?

#### Tempo versus clima

**P**ara definir clima é importante distingui-lo do *tempo* ou de *condições meteorológicas*. As condições meteorológicas que vivemos no dia a dia constituem um estado momentâneo da atmosfera caracterizado pela temperatura, pela precipitação, pelo vento e assim por diante, e parece variar de forma irregular, sem seguir um padrão particular.

Quando se consideram as escalas temporais mais longas, é possível notar que o *tempo* ou as *condições meteorológicas* variam de forma recorrente, seja em escala global, regional ou local. Isso é o que chamamos de clima. Diferentemente das condições instantâneas chamadas de tempo ou condições meteorológicas, o clima é descrito com valores médios (por exemplo, média anual ou temperatura média), mas também com variabilidade típica (por exemplo, máxima sazonal ou temperaturas mínimas) e frequência de eventos extremos, como monções, furacões ou ciclones. A escala de tempo sobre o qual são calculadas as estatísticas do clima é geralmente 30 anos (por exemplo, 1981-2010).

#### A função do sistema climático da Terra

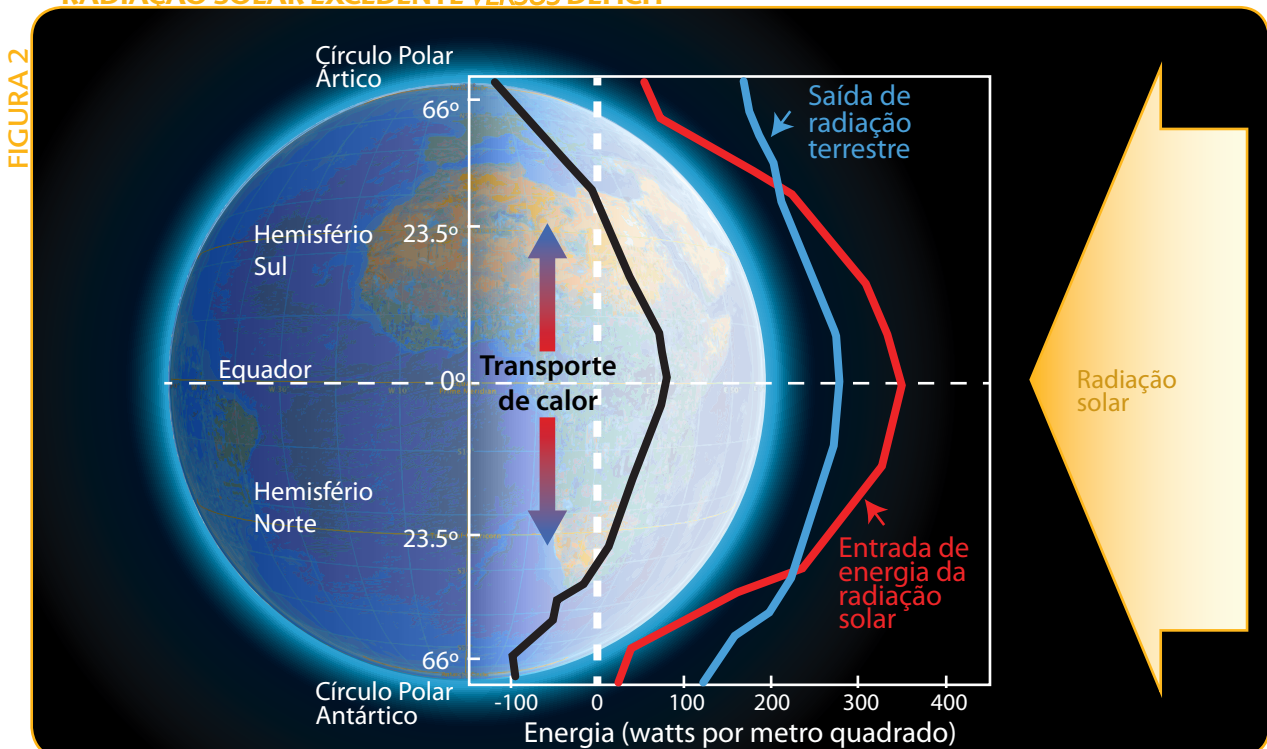
Uma enorme quantidade de energia vinda do Sol na forma de radiação solar atinge a Terra entre os

trópicos de Capricórnio e de Câncer (veja a Figura 1). Sem uma maneira de dissipar essa energia, o Equador seria incrivelmente quente e inóspito à vida. Por outro lado, como a Terra é uma esfera, os polos Norte e Sul recebem menos radiação solar e refletem ou liberam mais radiação de volta para o espaço. Se não recebessem energia adicional, essas regiões seriam frias demais para suportar qualquer tipo de vida. No entanto, tanto as regiões polares quanto a região equatorial permanecem habitáveis para seres humanos, espécies animais e vegetais.

Pode-se dizer que a região do Equador tem constante excesso de radiação solar (o que a torna quente) e os polos têm um déficit constante (o que os torna frios). O sistema climático da Terra fornece os meios para equilibrar o excesso e o déficit de energia e calor. Para isso, usa o ar, o vapor na atmosfera e a água dos oceanos para transportar energia ao redor do globo de modo a equilibrar levemente o desequilíbrio regional de energia dentro do sistema (veja a Figura 2).

De modo geral, o clima se mantém estável durante longos períodos de tempo, se os diferentes elementos do sistema também permanecerem estáveis. No entanto, se um ou mais dos componentes do sistema for alterado, a estabilidade de todo o sistema fica comprometida, o que pode levar a um comportamento atípico e originar *condições meteorológicas* que estão fora da faixa habitual de expectativas. Essa situação pode ser descrita como mudança climática.

#### RADIAÇÃO SOLAR EXCEDENTE VERSUS DÉFICIT



A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC na sigla em inglês) define mudança climática como “uma mudança de clima atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera mundial e se soma à variabilidade natural observada ao longo de períodos comparáveis”.

### Recursos adicionais

1. *Mudança do clima 2007: a base das ciências físicas*, contribuição do Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, Sumário para tomadores de decisão. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0015/15130.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0015/15130.pdf)>.
2. *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>>.
3. *Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Disponível em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/>>.
4. *Site da WMO – informações sobre mudança do clima para jovens*. Disponível em: <[http://www.wmo.int/youth/climate\\_en.html](http://www.wmo.int/youth/climate_en.html)>.
5. *Site da WMO sobre clima*. Disponível em: <[http://www.wmo.int/pages/themes/climate/index\\_en.php#](http://www.wmo.int/pages/themes/climate/index_en.php#)>.

## 1.2 O que causa a mudança climática?

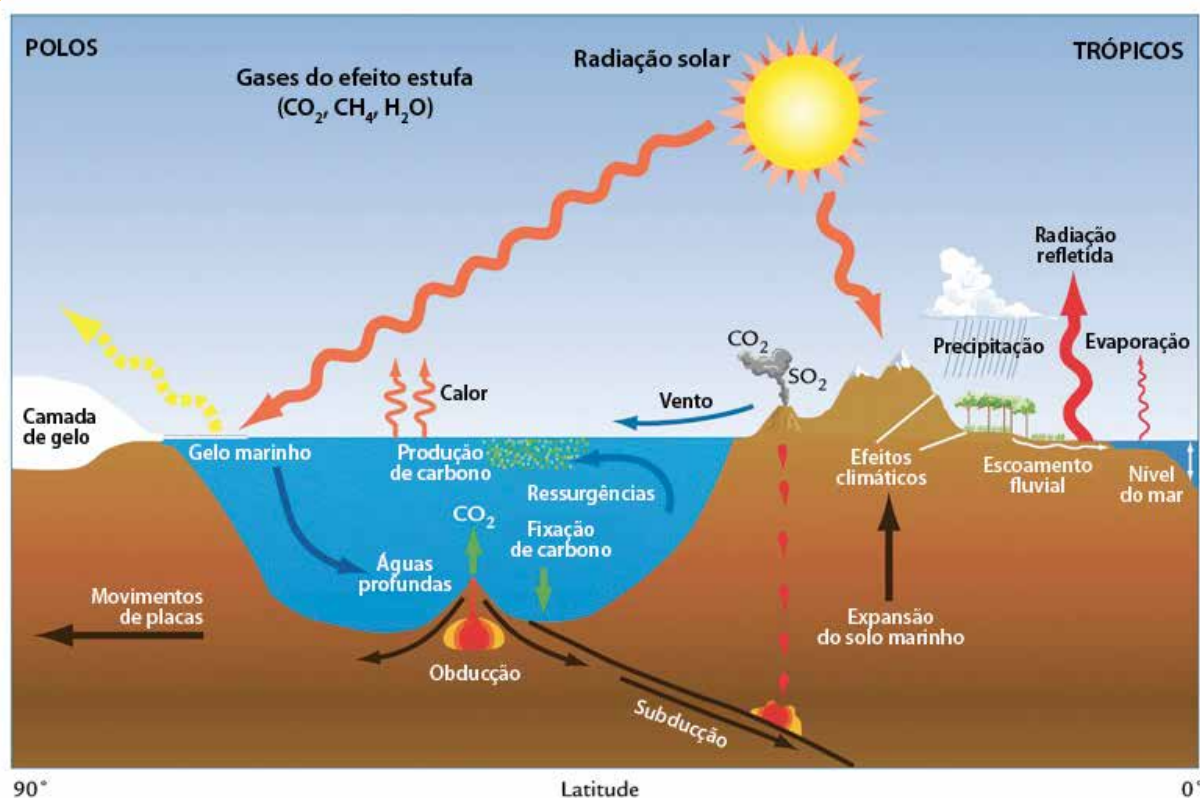
### Como funciona o clima e como sabemos que está mudando

Nos últimos séculos, tem havido muito debate sobre as influências e os gatilhos das mudanças radicais no clima da Terra entre uma era do gelo para um período úmido e vice-versa. Os cientistas modernos já suspeitavam que a atividade humana fosse capaz de afetar o clima e, até recentemente, os processos complexos que afetam tanto o balanço energético da Terra quanto os fluxos de energia dentro do sistema climático global eram pouco conhecidos.

Felizmente, as últimas décadas têm visto avanços significativos na ciência do sistema Terra, já que os pesquisadores realizaram progressos na quantificação dos fluxos de energia e dos materiais que determinam a dinâmica desses sistemas. Isso levou a uma compreensão mais clara sobre o funcionamento do clima e sobre os fatores que influenciam as mudanças no sistema climático global (veja a Figura 3).

### COMPONENTES DO SISTEMA CLIMÁTICO DA TERRA

FIGURA 3



CLARK COLLEGE, 2003.



# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

O clima da Terra é afetado por uma miríade de determinantes que operam em diferentes escalas de tempo e resultam em diferentes mudanças ao longo de diversas escalas geográficas e eras geológicas. O movimento de calor ao redor da Terra é determinado pelo sistema climático global, que compreende a atmosfera, os oceanos, as camadas de gelo, a biosfera (todos os organismos vivos), os solos, os sedimentos e as rochas. O sistema climático é composto por numerosos subsistemas interligados nos quais ocorrem diferentes processos. Essas interações complexas resultam em fenômenos intermitentes e em constante mudança (por exemplo, o El Niño e a Oscilação do Atlântico Norte) (ver texto “El Niño/La Niña (ENSO) e a Oscilação do Atlântico Norte”).

O estado do clima da Terra é determinado pela quantidade de energia armazenada pelo sistema climático e, principalmente, pelo equilíbrio

entre a energia recebida do Sol e a parte dessa energia que a Terra libera de volta para o espaço. Esse equilíbrio de energia global é regulado, em grande medida, pelos fluxos de energia dentro do sistema climático global.

Existem quatro principais influências conhecidas das grandes mudanças de longo prazo no clima da Terra. São elas: (i) mudanças na órbita da Terra ao redor do Sol, (ii) variações na produção de energia proveniente do Sol, (iii) mudanças na circulação oceânica resultantes, principalmente, de flutuações na ressurgência de águas frias profundas no Oceano Pacífico tropical e (iv) mudanças na composição da atmosfera. Embora as três primeiras influências estejam fora do controle da humanidade, a composição da atmosfera tem sido alterada por atividades humanas há mais de 200 anos.

### Composição da atmosfera

A atmosfera é uma camada de gases relativamente fina que fica rarefeita com a altitude e não tem um final definido.<sup>1</sup> Cerca de 80% da massa da atmosfera está abaixo de 10 km de altitude (veja a Figura 4). Quando comparada com o raio da Terra (6.370 km), a atmosfera é apenas um sexto de um 1%. No entanto, é uma camada multifuncional extremamente importante, composta de numerosos gases em diferentes proporções, em diferentes regiões e que têm funções diversas. É predominantemente composta de nitrogênio (78%) e oxigênio (21%). Além de vapor de água, vários outros gases também estão presentes em quantidades muito menores: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), neon (Ne), óxidos de nitrogênio, metano (CH<sub>4</sub>), criptônio (Kr) e ozônio (O<sub>3</sub>).

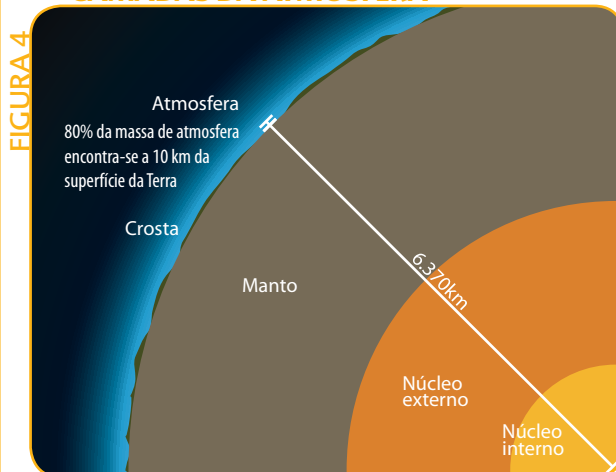
### El Niño/La Niña (ENSO) e a Oscilação do Atlântico Norte

O El Niño/La Niña — Oscilação Sul ou **ENSO** — é um padrão climático que ocorre em todo o Oceano Pacífico tropical aproximadamente a cada cinco anos. Caracteriza-se por variações na temperatura da superfície do Oceano Pacífico leste tropical — aquecimento ou resfriamento conhecidos como El Niño e La Niña, respectivamente — e na pressão atmosférica na superfície no Pacífico oeste tropical — Oscilação Sul. Os mecanismos que causam a oscilação continuam sob estudo.

A ENSO provoca condições meteorológicas extremas (como inundações e secas) em muitas regiões do mundo. No Brasil, anos de El Niño estão associados a secas nas regiões Norte e Nordeste e a chuvas mais intensas no Sul do país. Já anos de La Niña, a situação se inverte. As chuvas são mais abundantes no Norte e Nordeste do Brasil, enquanto a Região Sul sofre com secas severas. A frequência e a intensidade estão potencialmente sujeitas a mudanças dramáticas como resultado do aquecimento global e é alvo de pesquisa.

A **Oscilação do Atlântico Norte** combina um sistema permanente de baixa pressão sobre a Islândia (o Baixo Islandês) e um sistema de alta pressão permanente sobre os Açores (o Alto Açores) que controlam a direção e a força dos ventos de oeste para a Europa. As forças e as posições relativas desses sistemas variam de ano para ano e é justamente essa variação que é conhecida como a Oscilação do Atlântico Norte.

### CAMADAS DA ATMOSFERA



<sup>1</sup> Se considerarmos o tamanho padrão de um globo terrestre utilizados nas salas de aula, a atmosfera teria aproximadamente a espessura de uma camada de tinta em sua superfície.

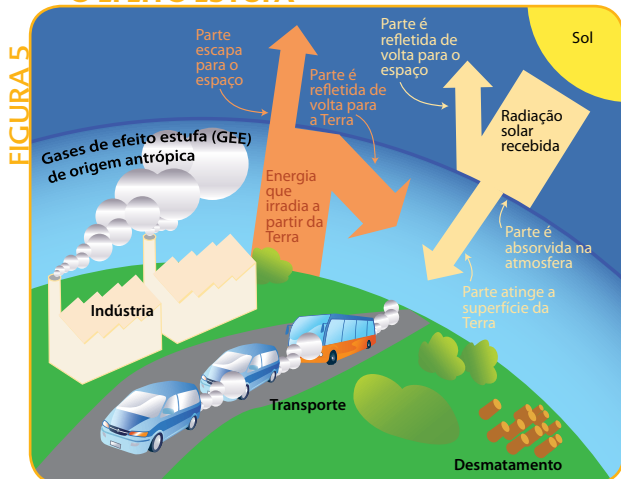
Essa mistura de gases facilita a natureza multifuncional da atmosfera, por um lado, ao permitir que uma porção da radiação solar dirigida para a Terra atinja a superfície, e, por outro, por inibir a saída de radiação de ondas longas (na forma de calor) de volta para o espaço. Essa função de retenção de calor é o que se conhece como *efeito estufa* e é esse fenômeno

que mantém a superfície da Terra em uma faixa de temperatura adequada para sustentar a vida como a conhecemos (veja a Figura 5). Depois do vapor de água, os gases de efeito estufa (GEE) mais importantes são dióxido de carbono, metano e ozônio.

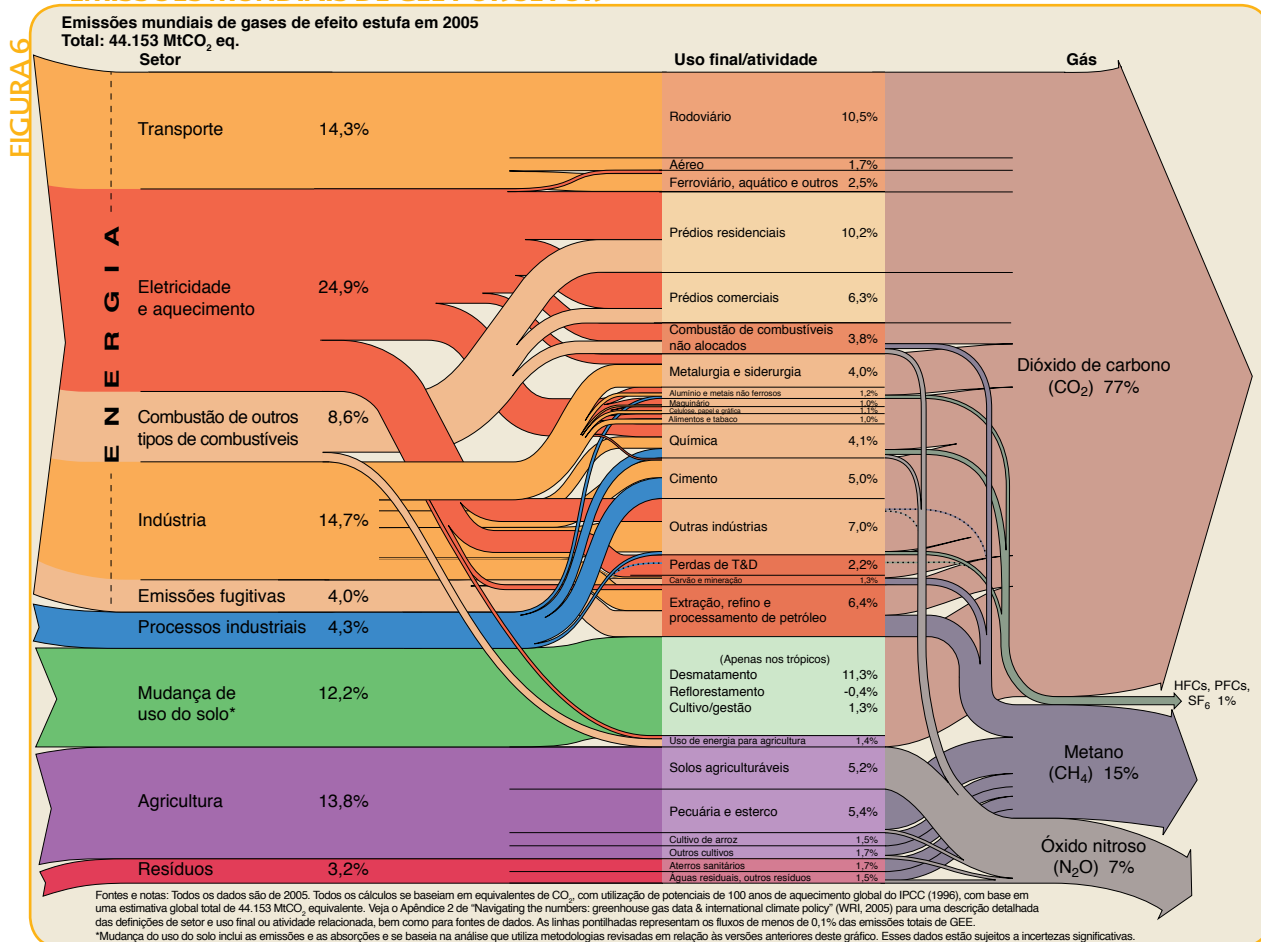
Os GEE permanecem ativos na atmosfera por longos períodos de tempo (veja a Tabela 1). Partículas e gases emitidos em grandes erupções vulcânicas, como a do Monte Pinatubo, em 1991, também podem afetar o clima global em períodos mais curtos (veja o texto “Os efeitos das erupções vulcânicas”). Por sua vez, entre outros fatores, a posição relativa e o movimento dos continentes também afetam o clima global, mas isso ocorre ao longo de milhões de anos.

Muitas atividades que emitem GEE são agora essenciais para a economia global e formam parte fundamental da vida moderna. O dióxido de carbono gerado pela queima de combustíveis fósseis é a maior fonte de emissões de GEE originados por atividades humanas. O fornecimento e a utilização de combustíveis fósseis

## O EFEITO ESTUFA



## EMISSIONES MUNDIAIS DE GEE POR SETOR



WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2005.

# Entenda os fatos:

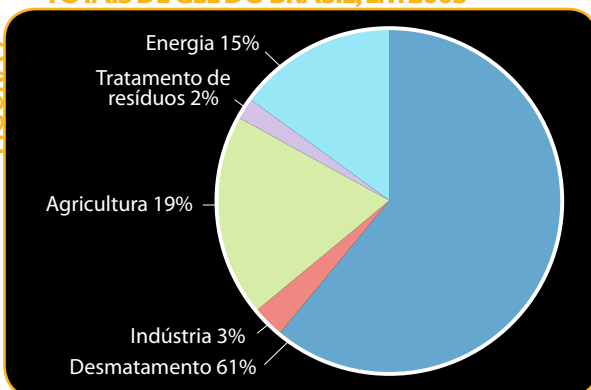
## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

são responsáveis por cerca de 80% das emissões de dióxido de carbono da humanidade ( $\text{CO}_2$ ), um quinto do metano ( $\text{CH}_4$ ) e uma quantidade significativa de óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Em resumo, os principais setores que contribuem para as emissões antrópicas de GEE são eletricidade e calor (24,9%), indústria (14,7%), transportes (14,3%) e agricultura (13,8%) (veja a Figura 6).

Já no Brasil, o perfil de emissões é um pouco diferente do contexto internacional. A matriz energética do país tem mais de 80% da sua base em hidrelétricas. Essa fonte de energia emite relativamente poucos GEE quando comparada à energia proveniente da queima de combustíveis fósseis. Assim, as contribuições de GEE do setor energético brasileiro (15%) é bem menor do que o contexto mundial. Em compensação, o Brasil é um dos maiores emissores globais de  $\text{CO}_2$  e metano devido ao desmatamento e à queima de vegetação da Amazônia e do Cerrado, bem como em função das atividades agropecuárias. Esses dois setores respondem juntos por 80% das emissões nacionais de GEE (veja a Figura 7).

### PARTICIPAÇÃO DOS SETORES NAS EMISSÕES TOTAIS DE GEE DO BRASIL, EM 2005

FIGURA 7



Em 2005, as emissões totais do Brasil somaram 2,2 bilhões de toneladas de  $\text{CO}_2$ .

Fonte: BRASIL. Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação. *II Comunicação Nacional do Brasil à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCTI, 2010.

### Medindo as mudanças de temperatura

Desde o final do século XIX, vários instrumentos terrestres e oceânicos têm sido usados para medir, de forma bastante precisa, a temperatura do ar perto da superfície da Terra. Ao longo dos últimos 40 anos, a adição de instrumentos em satélites tem produzido leituras extremamente precisas da temperatura. Uma vez que tais medições e registros de temperatura e de outras variáveis climáticas estão disponíveis há apenas uma fração da história da Terra, deve-se estudar perspectivas mais longas da evolução do clima

por meio de fenômenos naturais dependentes do clima, indícios que podem ser encontrados em florestas, núcleos de gelo e sedimentos do fundo do mar (veja a Figura 8).

### AMOSTRAS DE NÚCLEO DE GELO

FIGURA 8



Durante o século XX, as descobertas e controvérsias em torno das complexidades do sistema terrestre têm provocado interesse crescente dos cientistas, especialmente em relação a uma tendência significativa de aquecimento global. Pesquisadores começaram a investigar em que extensão a atividade humana pode ter provocado essas e outras grandes mudanças no sistema terrestre. Durante os últimos 25 anos, dezenas de milhares de pesquisadores e cientistas de renome emprestaram seus conhecimentos para uma intensa investigação e análise científica desses fenômenos — facilitadas e inspiradas pelo IPCC — em tentativas para determinar as fontes

### Os efeitos das erupções vulcânicas

Em 1990, o Monte Pinatubo injetou 20 milhões de toneladas de dióxido de enxofre na estratosfera na região equatorial. O resultado desse evento foi a queda das temperaturas médias hemisféricas em cerca de  $0,2^\circ\text{C}$ - $0,5^\circ\text{C}$  durante um período de um a três anos.



NASA Goddard Photo and Video



de GEE, monitorar a mudança climática em curso e compreender seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos.

Ao longo do século passado, a superfície da Terra e a parte mais baixa da atmosfera sofreram um aquecimento de cerca de  $0,76^{\circ}\text{C}$ . De fato, desde que os registros começaram no início dos anos 1860 — o auge da Revolução Industrial — as médias globais de temperaturas na superfície vêm aumentando continuamente. Nas últimas duas décadas, o ritmo de aumento das temperaturas médias globais acelerou a uma taxa equivalente a  $1,0^{\circ}\text{C}$  por século. Nove dos anos mais quentes já registrados no histórico de medições ocorreram na última década (veja a Figura 9, na próxima página). Durante esse período de registro do aquecimento global, a concentração de GEE na atmosfera também aumentou. Esse aumento está diretamente

associado às atividades humanas, ou seja, à queima de combustíveis fósseis para energia e transporte, ao desmatamento e a outras mudanças no uso do solo. Nos últimos 20 anos, tem crescido a preocupação de que os dois fenômenos estejam, pelo menos em parte, altamente correlacionados. O aquecimento da superfície da Terra que vem ocorrendo desde a década de 1970 é agora considerado explicável apenas como resultado de emissões de GEE de fontes humanas.

## Consenso científico atual

Em 2003, a *American Geophysical Union* concluiu que “é cientificamente inconcebível que — depois de transformar floresta em cidades, colocar poeira e fuligem na atmosfera, colocar em agricultura irrigada em milhões de hectares de deserto e gases de efeito estufa na atmosfera — os seres humanos não tenham alterado o curso natural do sistema climático”.<sup>2</sup>

Embora o tema da mudança climática continue a ser um assunto muito complexo e altamente debatido (pública e politicamente), o aquecimento global é um fato inegável. Além disso, as evidências agora indicam firmemente que há uma discernível influência humana sobre o clima global; em poucas palavras, os seres humanos têm contribuído para o aquecimento global.<sup>3</sup> O atual consenso da comunidade científica é que as conclusões fundamentais listadas a seguir permitem vislumbrar apenas uma pequena parte das mudanças que as gerações futuras terão de aceitar e enfrentar.

<sup>2</sup> AMERICAN GEOPHYSICAL UNION, *Eos*, 84, n. 51, p. 574, 2003.

<sup>3</sup> PACHAURI R.K.; REISINGER, A. (Eds.). *Climate change: synthesis report*. IPCC, 2007. p. 104.

## CONTRIBUIÇÕES RELATIVAS DOS PRINCIPAIS GEE PARA O EFEITO ESTUFA E A VIDA MÉDIA ATMOSFÉRICA

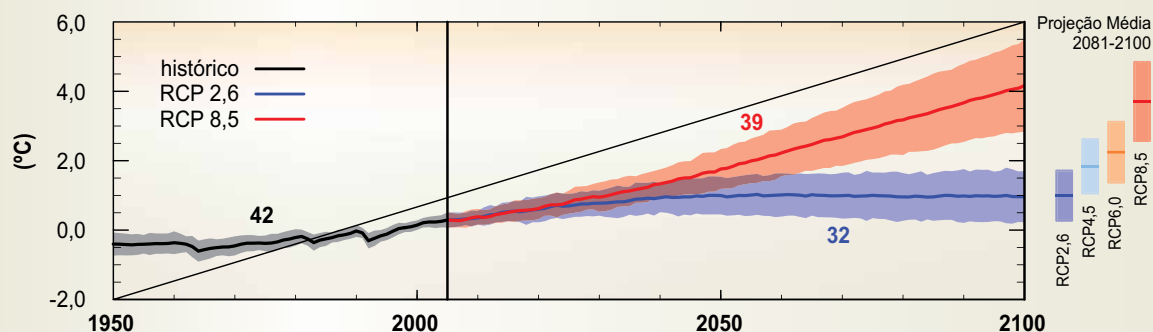
TABELA 1

GEE	Contribuição (%)	Vida média
Vapor de água	36% a 66%	9 dias
Dióxido de carbono	9% a 26%	Dezenas de milhares de anos
Metano	4% a 9%	12 anos
Ozônio	3% a 7%	9 a 11 dias

Nota: “Frequentemente a determinação do tempo de vida atmosférica do  $\text{CO}_2$  é subestimada, uma vez que, de maneira incorreta, ignoram-se os fluxos de equilíbrio de  $\text{CO}_2$  que vão da atmosfera para outros reservatórios — onde são removidos pela mistura com os oceanos, pela fotossíntese ou por outros processos. São as mudanças de concentração líquida dos vários gases de efeito estufa de todas as fontes e sumidouros que determinam o tempo de vida atmosférica e não apenas os processos de remoção.”  
Fonte: ARCHER, D. Fate of fossil fuel  $\text{CO}_2$  in geologic time, *Journal of Geophysical Research*, v. 110, n. C9, p. C09S05.1–5.6, 2005.

## VARIAÇÕES DE TEMPERATURA MÉDIA NA SUPERFÍCIE DA TERRA — ANOS 1950 A 2100

FIGURA 9



Fontes e notas: Projeções do aumento das temperaturas médias globais em 2100 em relação às médias 1986-2005 em diferentes cenários de concentração de gases de efeito estufa. RCP 2,6 (421 ppm); RCP 4,5 (538 ppm); RCP 6,0 (670 ppm); RCP 8,5 (939 ppm). O gráfico apresenta apenas as projeções das temperaturas nos cenários extremos (RCP 2,6 e RCP 8,5). As faixas coloridas em torno das linhas de tendência são os gradientes dentro dos quais a temperatura pode variar em cada cenário. (IPCC. *Climate change: summary for policymakers; contribution of working group IV to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Cambridge University Press, 2013).

# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

- O planeta está se aquecendo devido ao aumento das concentrações de gases que aprisionam o calor na nossa atmosfera.
- A maior parte do aumento da concentração desses gases no último século se deve a atividades humanas, principalmente à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento.
- As causas naturais sempre desempenharam um papel na mudança do clima da Terra, mas agora estão sendo suplantadas pelas mudanças induzidas pelos seres humanos.
- O aquecimento do planeta causará mudanças em muitos outros padrões climáticos a velocidades sem precedentes nos tempos modernos, incluindo o crescimento das taxas de aumento do nível do mar e alterações no ciclo hidrológico. O aumento das concentrações de dióxido de carbono também tem tornado os oceanos mais ácidos.
- Os impactos da mudança climática já podem ser observados, incluindo padrões meteorológicos mais frequentes e extremos, alterações no crescimento vegetal — o que afeta a agricultura e a produção de alimentos —, perda de espécies vegetais e animais que não conseguem se adaptar ou migrar diante das mudanças nas condições ambientais, mudanças na propagação de doenças infecciosas no que diz respeito às taxas de disseminação e expansão da abrangência, mudanças no fluxo das correntes oceânicas e mudanças nas estações do ano.
- A combinação dessas mudanças complexas ameaça as comunidades costeiras, rurais e urbanas, nossos alimentos e abastecimento de água, os ecossistemas marinhos e de água doce, florestas, ambientes montanhosos e muito mais.<sup>4</sup>

### Recursos adicionais

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Bases científicas das mudanças climáticas*: Contribuições do Grupo de Trabalho 1 para o primeiro relatório de avaliação nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasília, 2013. Disponível em: <[http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/MCTI\\_PBMC\\_Sumario%20Executivo%204\\_Finalizado.pdf](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/MCTI_PBMC_Sumario%20Executivo%204_Finalizado.pdf)>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil*: parte I. Brasília, 2005. Disponível em: <[http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/segunda-comunicacao-nacional-do-brasil?category\\_id=7](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/segunda-comunicacao-nacional-do-brasil?category_id=7)>.

IPCC. *Climate change 2007: mitigation; contribution of working group III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, 2007.

McMULLEN, C.; JABBOUR, J. (Eds.). *Climate Change Science Compendium 2009*. New York: United Nations Environment Programme, EarthPrint, 2009. Disponível em: <<http://www.PNUMA.org/compendium2009/>>.

*Mudança climática* (vídeo). Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ssvFqYSIMho>>.

PNUMA. *Understanding Climate Change: a beginner's guide to the UN Framework Convention and its Kyoto Protocol*. New York, 1999. Disponível em: <<http://www.PNUMA.org/dec/docs/info/ccguide/beginner-99.htm>>.

### 1.3 O que mudou até agora?

As observações mostram que o aquecimento do clima é inequívoco. O aquecimento global dos últimos 50 anos se deve principalmente ao aumento de emissões de GEE induzidas pelo homem. Essas emissões decorrem principalmente da queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), com contribuições adicionais do desmatamento de florestas, práticas agrícolas e outras atividades. Os efeitos das atividades humanas também foram identificados em muitos outros aspectos do sistema climático, incluindo mudanças no conteúdo de calor dos oceanos, na precipitação, na umidade atmosférica e no gelo do Oceano Ártico.

Essa conclusão se baseia em várias evidências. Em primeiro lugar, o exame dos registros da mudança climática ao longo dos últimos mil a 2 mil anos mostram que as temperaturas da superfície global nas últimas várias décadas foram maiores do que em qualquer momento nos últimos (pelo menos) 400 anos (mil anos para o Hemisfério Norte). Uma segunda fonte de evidência é a nossa maior compreensão sobre como os GEE aprisionam o calor, como o sistema climático responde a aumentos de GEE e como outros fatores humanos e naturais influenciam o clima. Como resultado de tal conhecimento, há uma ampla consistência qualitativa entre as mudanças observadas no clima e as simulações computadorizadas da resposta esperada do clima às atividades humanas. Finalmente, há extensa evidência estatística. Em 2007, a comunidade de cientistas que reportam ao IPCC identificou 765 mudanças significativas observadas no sistema físico (neve, gelo e solo

<sup>4</sup> SILLIS, J. Climate change and the integrity of science. *Science*, n. 328, p. 691-692, 2010.



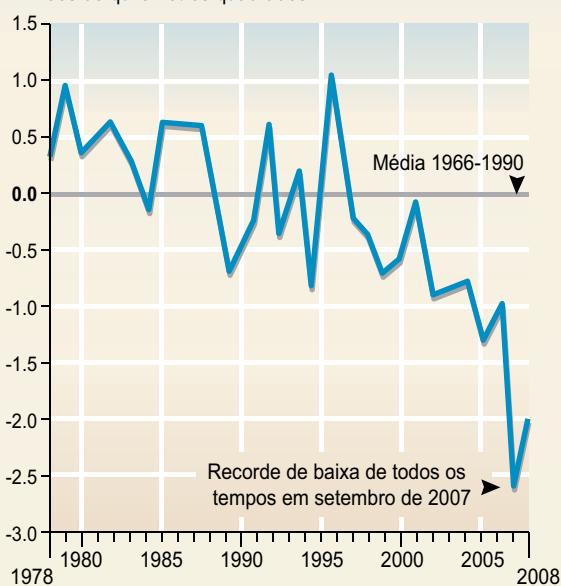
congelado, hidrologia e processos costeiros), das quais 94% eram consistentes com a mudança climática. Da mesma forma, as observações de sistemas biológicos (terrestre, marinho e de água doce) identificaram 28.671 mudanças significativas que estavam de acordo com 90% dos impactos esperados da mudança climática.

### DIMINUIÇÃO DA EXTENSÃO DO GELO MARINHO

FIGURA 10

#### Extensão mínima do gelo marinho

Anomalias da cobertura de gelo no Hemisfério Norte  
Milhões de quilômetros quadrados



Fonte: US National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2008.

Zoë Environment Network and GRID-Arendal, 2009.

### Aquecimento crescente

Como já mencionado, a temperatura média da superfície global aumentou cerca de 0,76°C desde o ano de 1900, e grande parte deste aumento ocorreu a partir de 1970. A estimativa da mudança na temperatura média da superfície da Terra se baseia em medições de milhares de estações meteorológicas, navios e boias em todo o mundo, bem como em dados de satélites. Essas medições são compiladas, analisadas e processadas independentemente por diferentes grupos de pesquisa. A evidente tendência de aquecimento em todos esses registros se confirma por outras observações independentes, como o derretimento do gelo do Oceano Ártico (veja a Figura 10), o recuo dos glaciares montanhosos em todos os continentes, a redução da extensão de cobertura de neve, o aumento do derretimento da camada de gelo na Groenlândia e na Antártida e o florescimento precoce das plantas na primavera.

O aumento da temperatura acontece em todo o mundo e é ainda maior nas latitudes setentrionais elevadas. As temperaturas médias do Ártico aumentaram quase duas vezes mais que a taxa média global nos últimos cem anos. Regiões terrestres se aqueceram mais rapidamente do que os oceanos. As observações mostram que a temperatura média global dos oceanos aumentou em profundidades de pelo menos 3.000 metros e que os oceanos têm recebido mais de 80% do calor adicionado ao sistema climático. Medições da temperatura do ar por satélite em altitudes elevadas mostram taxas de aquecimento semelhantes às aquelas observadas na temperatura de superfície.

### Mudanças nos padrões de precipitação

Globalmente, a precipitação mostra uma pequena tendência de aumento com a maior parte desse aumento durante a estação chuvosa. Em termos regionais, o aumento da precipitação anual ocorreu nas latitudes mais altas do Hemisfério Norte, no sul da América do Sul e no norte da Austrália. As reduções ocorreram na região tropical da África e no sul da Ásia. As mudanças na precipitação medidas são consistentes com as mudanças observadas nos fluxos fluviais, nos níveis de lagos e na umidade do solo (quando há dados disponíveis analisados) (veja a Figura 11).

Os cientistas também notaram mudanças na quantidade, na intensidade, na frequência e no tipo de precipitação. Tem-se observado pronunciados aumentos na precipitação ao longo dos últimos cem anos no leste da América do Norte, no sul da América do Sul, na Ásia e no norte da Europa. Reduções foram observadas na região do Mediterrâneo, na maior parte da África e no sul da Ásia.

A quantidade de chuva que cai nas precipitações mais pesadas aumentou cerca de 20%, em média, no século passado, e é muito provável que essa tendência continue, com os maiores aumentos nos lugares mais úmidos. Tem-se documentado evidências de aumento na força de furacões e ciclones que relacionam essas mudanças ao aumento da temperatura da superfície do mar e ao aquecimento do ar (veja a Figura 12).

As mudanças na distribuição geográfica das secas e das inundações têm sido complexas. Em algumas regiões, houve aumento na ocorrência

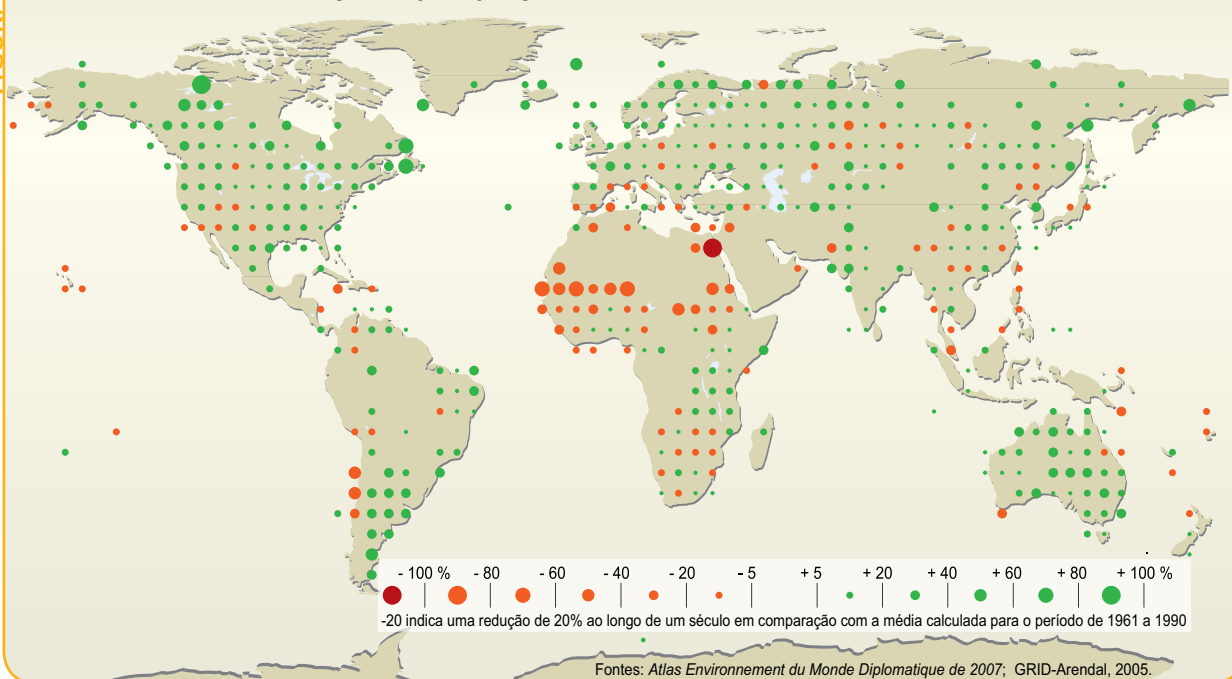
# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

### MUDANÇAS OBSERVADAS NA PRECIPITAÇÃO

FIGURA 11

Mudanças na precipitação anual entre 1901 e 2004



Zoë Environment Network and GRID-Arendal, 2009.

tanto de secas quanto de inundações. À medida que o mundo aquece, as regiões do norte e as áreas montanhosas têm experimentado mais precipitação que cai como chuva em vez de neve. Houve aumentos generalizados de eventos de precipitação intensa, mesmo em lugares onde os montantes totais de chuva diminuíram.

### Questões hídricas

A mudança climática já alterou o ciclo da água ao afetar onde, quando e quanta água está disponível para todos os usos. Além disso, provavelmente haverá escassez de água em alguns lugares, água demais em outros lugares e degradação da qualidade da água em outras regiões — e é esperado que alguns locais estejam sujeitos a todas essas condições em diferentes épocas do ano. A previsão é que as mudanças no ciclo da água continuem e afetem negativamente a produção de energia hidroelétrica, a disponibilidade de água potável, a saúde humana, o transporte, a agricultura e os ecossistemas.<sup>5</sup>

### Ecossistemas vulneráveis

A mudança climática tem afetado muitos

<sup>5</sup> Estas alterações estão associadas ao fato de que o ar mais quente contém mais vapor de água que evapora dos oceanos e da superfície da Terra. Esse aumento do vapor de água na atmosfera tem sido observado a partir de medições por satélite.

ecossistemas ao redor do mundo. Talvez o mais divulgado de todos os impactos do aquecimento global sejam os ecossistemas árticos dependentes do gelo marinho, que está desaparecendo rapidamente e, segundo previsões, deve desaparecer completamente nos verões no século XXI.

As algas que crescem na parte de baixo do gelo do mar formam a base de uma cadeia alimentar que liga animais microscópicos e peixes a focas, baleias, ursos polares e pessoas. À medida que o gelo do mar desaparece, essas algas também desaparecem. O gelo também fornece uma plataforma vital para as focas, que dependem dessa superfície para dar à luz, amamentar seus filhotes e descansar. Já ursos polares usam o gelo como plataforma para caçar suas presas e morsas repousam sobre o gelo perto da plataforma continental entre seus mergulhos para comer mariscos e outros frutos do mar. Como a borda de gelo está recuando e se distanciando para zonas mais profundas, não haverá mariscos nas proximidades.

Os impactos observados e documentados da mudança climática incluem: aumento do nível do mar, o que ameaça habitats costeiros e assentamentos humanos; aumento da temperatura da superfície do mar com maior frequência nas ondas de calor no oceano, o que causa branqueamento e morte de corais (veja a Figura 13); acidificação dos oceanos devido

## CRESCIMENTO NO NÚMERO DE DESASTRES RELACIONADOS AO TEMPO

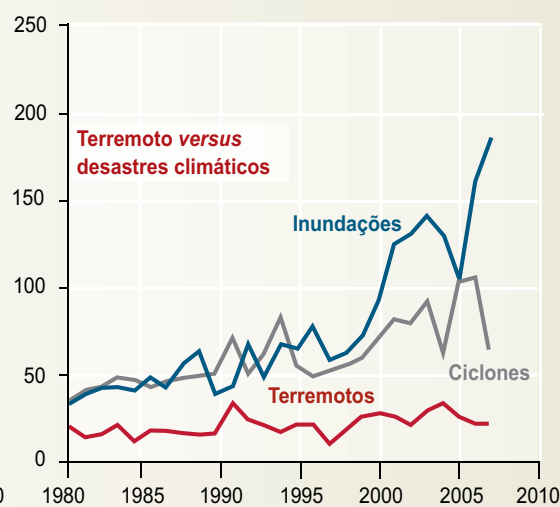
Número de desastres por ano



Fonte: CRED. Annual Disaster Statistical Review 2006, 2007.

### Tendências no número de desastres registrados

Grande parte do aumento no número de eventos perigosos relatados provavelmente se deve a melhorias significativas no acesso à informação e também ao crescimento da população, mas o número de inundações e ciclones relatados ainda está subindo em relação ao de terremotos.



Zoë Environment Network and GRID-Arendal, 2009.

ao aumento da absorção de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) por águas da superfície do mar, o que dificulta a formação de conchas e recifes de coral (veja a Figura 14); derretimento de geleiras e calotas de neve, incluindo rápido recuo das geleiras tropicais e perda da função natural de regulação da água (veja Figura 15); maior frequência de incêndios florestais; propagação de doenças e pragas para áreas naturalmente protegidas por condições climáticas; mudanças na produtividade vegetal e potencial incompatibilidade dos ciclos de vida simbióticos interligados; entre outros fenômenos.

### Florestas: beneficiárias da mudança climática?

O clima tem forte influência sobre os processos que controlam o crescimento e o desenvolvimento dos ecossistemas. Aumentos de temperatura geralmente aceleram o crescimento das plantas, a decomposição e a velocidade da ciclagem de nutrientes, embora

outros fatores também influenciem essas taxas, como a disponibilidade de água suficiente. Ao longo das últimas décadas, o crescimento das florestas tem aumentado como consequência de uma série de fatores: florestas jovens que chegam à maturidade, aumento da temperatura, aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera, safras mais longas e aumento da deposição de nitrogênio da atmosfera. Separar os efeitos de cada um dos fatores continua a ser um desafio.

A maior concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera faz com que árvores e outras plantas capturem mais carbono da atmosfera, mas experiências demonstram que as árvores convertem grande parte desse carbono extra para a produção de raízes e galhos finos em vez de madeira nova. Assim, o efeito do  $\text{CO}_2$  no aumento do crescimento parece ser relativamente modesto e, geralmente, é mais observado em florestas jovens em solos férteis, onde também há água suficiente para sustentar esse crescimento. Quando há aumento da seca, há redução da produtividade da floresta e aumento da perda de árvores.



# Entenda os fatos:

## A CIÊNCIA POR TRÁS DA MUDANÇA CLIMÁTICA

### Impactos adicionais observados

Outras mudanças consistentes com o aquecimento observado durante as últimas décadas e ainda não mencionadas incluem:

- redução no gelo de lagos e rios;
- mudanças na umidade do solo e no escoamento superficial;
- mudanças na extensão do gelo permanente;
- mudanças nas cadeias alimentares dos ecossistemas marinhos;
- massiva extinção de espécies;
- floração precoce; e
- aumento da variabilidade meteorológica.

### BRANQUEAMENTO DE CORAIS

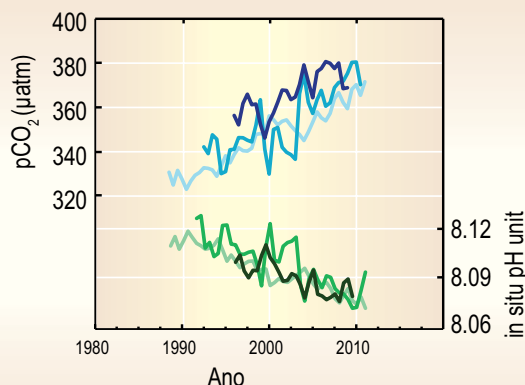
FIGURA 13



Embora muitas incertezas persistam e surpresas sejam esperadas, é evidente que os impactos mencionados não ocorrem isoladamente. Cada um tem consequências que podem — e provavelmente irão — induzir uma cadeia de impactos, de pequeno ou grande porte, nos ecossistemas interligados em todas as regiões e em todos os continentes. Similar ao

### ACIDIFICAÇÃO GLOBAL DOS OCEANOS

FIGURA 14



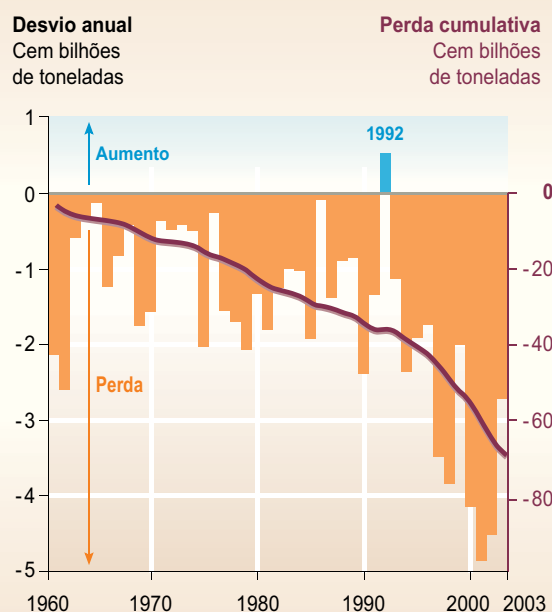
Fonte: IPCC, 2013.

As linhas em azul representam a evolução das concentrações de  $\text{CO}_2$  nos oceanos; as verdes mostram a evolução do pH dos oceanos.

rastreamento de perturbações na parte de cima da cadeia alimentar, essas consequências irão permear através da flora, da fauna e de diversas espécies para finalmente exercer um impacto combinado na sociedade humana. A questão permanece quanto à forma como a humanidade irá reagir à ameaça da mudança climática e que preparativos serão feitos para enfrentar os desafios impostos por um clima futuro incerto e imprevisível.

### EQUILÍBRIO GLOBAL DAS MASSAS GLACIAIS

FIGURA 15



Source: IPCC, 2007.

Zoë Environment Network and GRID-Arendal 2009

### Recursos adicionais

*Aquecimento Global e branqueamento de corais no Brasil:* vídeo baseado na pesquisa da Coral Vivo: apresentado no Fantástico em 2010. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=mzMELsm6h18>>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Segunda Comunicação Nacional do Brasil: parte II. Brasília, 2005. Disponível em: <[http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/segunda-comunicacao-nacional-do-brasil-parte02?category\\_id=7](http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/publicacoes/documentos-publicos/item/segunda-comunicacao-nacional-do-brasil-parte02?category_id=7)>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Sumários executivos da Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. Brasília, 2007. Disponível em

português em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/50401.html>>.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Sumários executivos da Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Primeiro Relatório de Avaliação do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Brasília, 2013. Disponível em português em: <<http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/noticias/82-destaque/393-ja-estao-disponiveis-os-sumarios-executivos-do-gt1-gt2-e-gt3-para-download>>.

*Derretimento das geleiras na Groelândia*: vídeo apresentado no Fantástico em 2010. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=dWQUCwf-BMc>>.

↪ Voltar para o Guia didático:  
A ciência básica da mudança climática

↪ Voltar para Apostila 2:  
“Ciência básica da mudança climática”