

MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Texto original: **Wikipédia, a enciclopédia livre.**

Fevereiro/2025

Ampliação, tradução e ilustrações: **Iran Carlos Stalliviere Corrêa-IG/UFRGS**

A **mudança climática** pode ser definida como a variação no estado do sistema climático da Terra, formada pela atmosfera, a hidrosfera, a criosfera, a litosfera e a biosfera, com duração de longos períodos de tempo (décadas ou mais), para alcançar um novo equilíbrio. Pode afetar tanto os valores climáticos médios quanto sua variabilidade e extremos.

As **mudanças climáticas** existem desde o início da história da Terra, essas podem ter sido graduais ou abruptas e foram e tiveram suas origens em várias causas, como aquelas relacionadas a mudanças nos parâmetros orbitais, variações na radiação solar, deriva continental, períodos de intenso vulcanismo, processos bióticos ou impactos de meteoritos. A maior parte da atual mudança climática é de origem **antropogênica** e está relacionada principalmente à intensificação do **efeito estufa** devido às emissões industriais da queima de combustíveis fósseis.

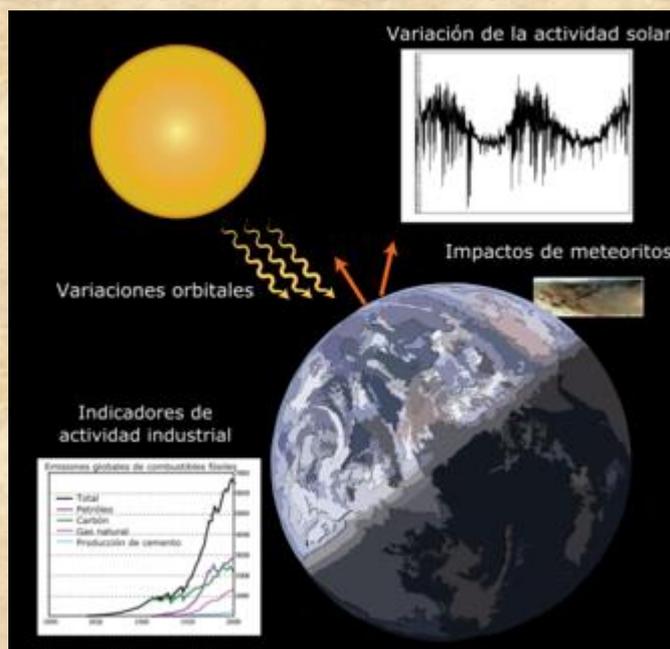


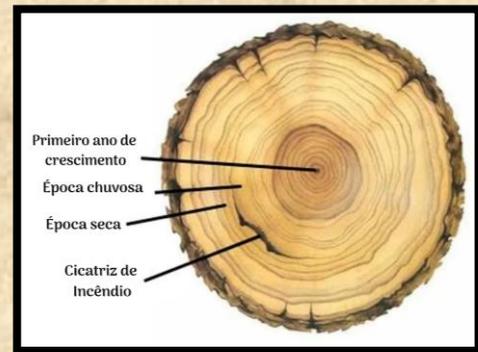
Ilustração dos principais fatores que influenciam nas mudanças climáticas

Pesquisas estão sendo elaboradas para entender o clima passado e futuro através de observações e modelos teóricos. Para fazer isso, eles coletam registros climáticos do passado remoto da Terra com base em evidências geotécnicas de levantamentos geotécnicos de perfis térmicos, testemunhos de gelo, registros de flora e fauna, como **crescimento de anéis de árvores** e **corais**, **processos glaciais e periglaciais**, **análise isotópica** e outras análises de **camadas de sedimentos** e **níveis do mar** de um período passado. Qualquer variação de longo prazo observada a partir destes (*proxies*) pode indicar as **mudanças climáticas**.



Testemunho de gelo da Antártica

(fonte: <https://t.ctcdn.com.br/A5Gjcb39Gd95WC0zD8RPQnzPIM=/1024x576/smart/i709914.png>)



Anéis de crescimento em árvores

(fonte: <https://i0.wp.com/florestalbrasil.com/wp-content/uploads/2019/02/Espa25C325A7o2Breservado2Bpara>)

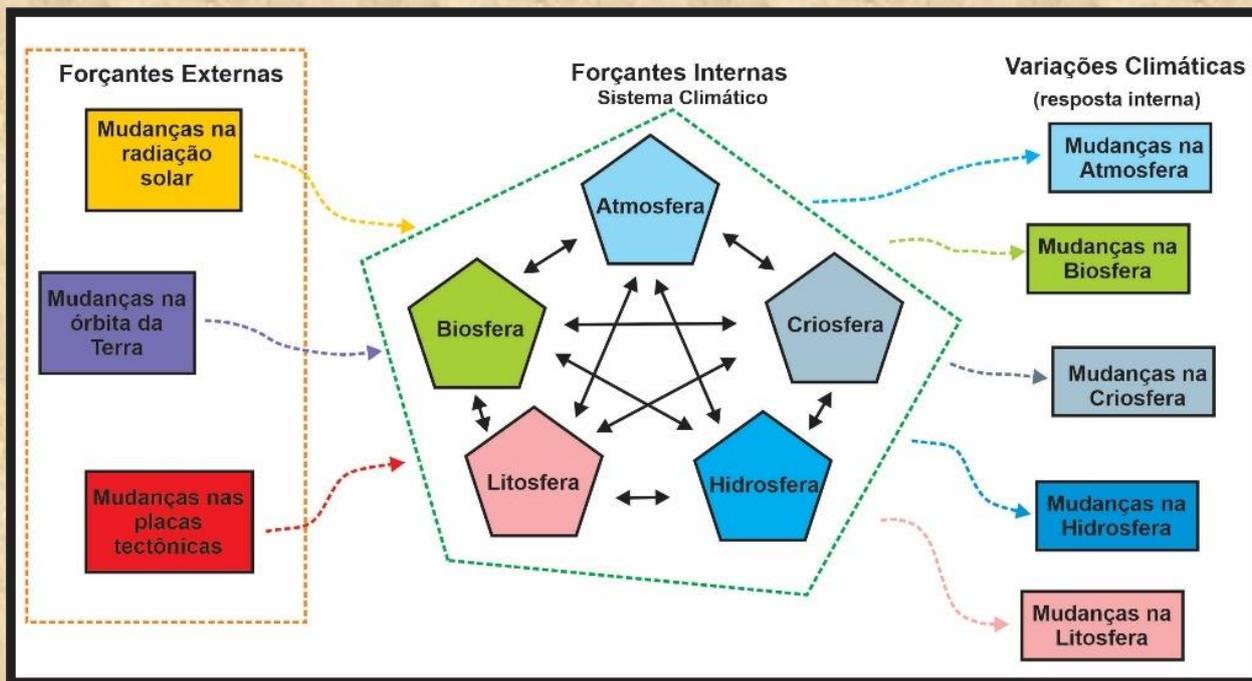
Os **registros instrumentais** fornecem dados mais recentes. Bons exemplos são os registros instrumentais de temperatura atmosférica e medições da concentração atmosférica de CO₂. Não devemos esquecer o enorme fluxo de dados meteorológicos de satélites em órbita pertencentes principalmente aos programas de observação da Terra da NASA ESA.



Instrumentos para medida de temperatura e concentração de CO₂ na atmosfera

(fonte: https://static.testo.com/image/upload/c_fill,w_900,h_600,q_auto/f_auto/q_auto/HQ/testo-industrial-flue-gas-analyzers-product-range?_a=BATAXdAA0)

Modelos de circulação geral são frequentemente usados em abordagens teóricas para tentar reconstruir climas passados, fazendo projeções futuras e associando as causas e efeitos das mudanças climáticas.



Forçantes internas e externas do sistema climático da Terra.

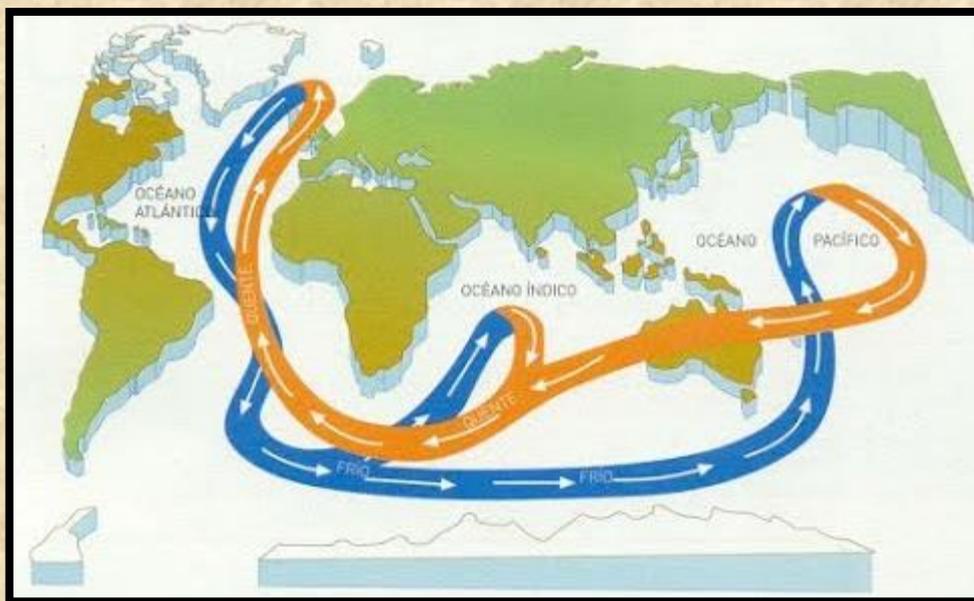
Fatores externos que podem influenciar o clima são chamados de **forçantes climáticas**. As **forçantes climáticas** são fatores que afetam o balanço energético do sistema climático, modificando a quantidade de energia que o sistema recebe do Sol ou a quantidade de energia que o sistema perde, por emissão da Terra, para o espaço exterior. Os cientistas climáticos que estudam as mudanças climáticas atuais muitas vezes os chamam de **forçantes radiativas** e consideram basicamente quatro delas: a quantidade de radiação solar no topo da atmosfera, o albedo terrestre, a concentração de gases de efeito estufa e a concentração de aerossóis tanto de origem natural, como as de erupções vulcânicas, como as de origem antropogênica, que vêm de atividades humanas, entre outras.

Os paleoclimatologistas, no entanto, consideram como **forçantes climáticas externas** uma gama muito maior de fenomenologia extraterrestre que inclui variações nos parâmetros orbitais da Terra ou queda de meteoritos. As variações orbitais, por exemplo, alteram a distribuição geográfica e sazonal da radiação solar, mas mal modificam o balanço energético planetário, ou seja, não constituem uma forçante radiativa relevante. Precisamente, um dos objetivos dos climatologistas e paleoclimatologistas é entender quais mecanismos amplificadores induzem essas variações orbitais para explicar os diferentes ciclos glaciais que ocorreram na história do nosso planeta.

No que diz respeito aos processos internos, do ponto de vista climatológico, a variabilidade natural estudada, principalmente dentro do mesmo sistema climático, não causa alterações no **equilíbrio radiativo da atmosfera**. Essa variabilidade ocorre como

resultado da interação dinâmica entre a atmosfera e o oceano, geralmente em escalas de tempo de alguns anos a algumas décadas. Os fenômenos mais conhecidos desta variabilidade interna são a circulação termoalina e o ENSO (*El Niño*). Assim, por exemplo, os anos *El Niño*, a partir de 1997, correspondem a temperaturas globais acima da média.

Os paleoclimatologistas acrescentam aos processos internos aqueles inerentes à dinâmica planetária que afetam o clima. Estes incluem orogênese (formação de montanha), placas tectônicas, vulcanismo e mudanças biológicas a longo prazo, como a evolução das plantas terrestres. A placa tectônica juntamente com a erosão, por exemplo, pode contribuir, através do Ciclo Geoquímico Carbonato-Silicato, para o sequestro de CO₂, reduzindo a quantidade de gases de efeito estufa e, assim, diminuindo a temperatura global. O vulcanismo maciço e constante devolve a atmosfera o dióxido de carbono sequestrado no manto pelos processos da subducção. Esses processos operam em períodos geológicos de dezenas de milhares a vários milhões de anos.

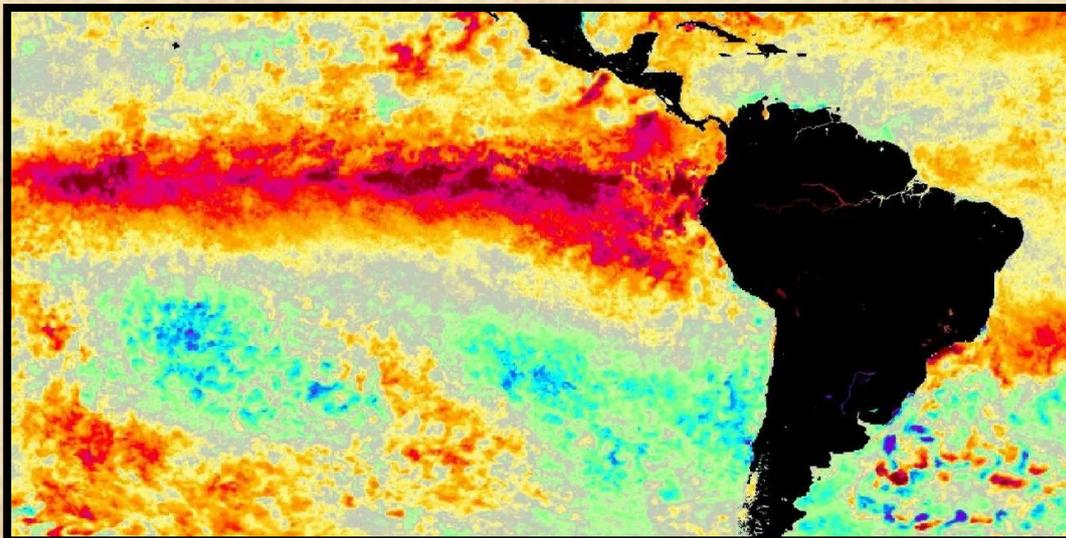


Circulação termoalina

(fonte: <https://i.ytimg.com/vi/9q6wkEg3Yws/hqdefault.jpg>)

Terminologia

A definição mais geral de **mudança climática** é uma mudança nas propriedades estatísticas (principalmente a média e dispersão) do sistema climático considerado por longos períodos, independentemente da causa. Portanto, flutuações por períodos mais curtos do que algumas décadas, como El Niño, não representam as mudanças climáticas.



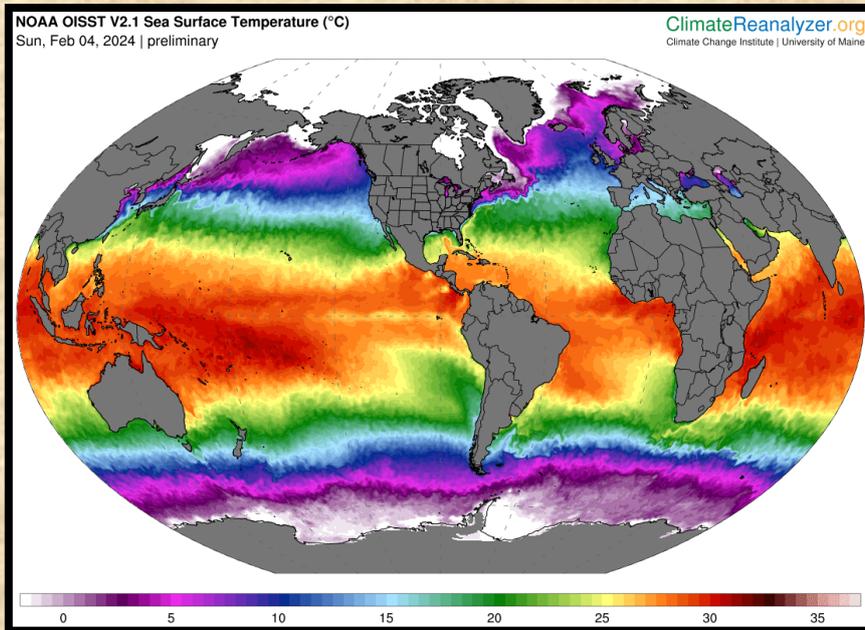
El Niño de 2023-2024 ao redor do seu pico de intensidade.

(fonte: <https://metsul.com/wp-content/uploads/2023/12/nino1112c-1-1280x640.jpg>)

O termo às vezes é usado para se referir especificamente às **mudanças climáticas** causadas pela atividade humana, em vez de mudanças no clima que podem ter resultado como parte dos processos naturais da Terra. A este respeito, especialmente no contexto da política ambiental, a **mudança climática** tornou-se sinônimo de aquecimento global antropogênico. Em publicações científicas, o aquecimento global refere-se ao aumento das temperaturas da superfície, enquanto a mudança climática inclui o aquecimento global e todos os outros efeitos do aumento dos níveis de gases de efeito estufa. A **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas** define as mudanças climáticas em seu segundo parágrafo do Artigo 1 como uma mudança no clima direta e indiretamente atribuída à atividade humana que altera a composição da atmosfera e aumenta a variabilidade natural do clima observado durante períodos de tempos comparáveis. Por vezes, o termo mudança climático é confundido com mudança global.

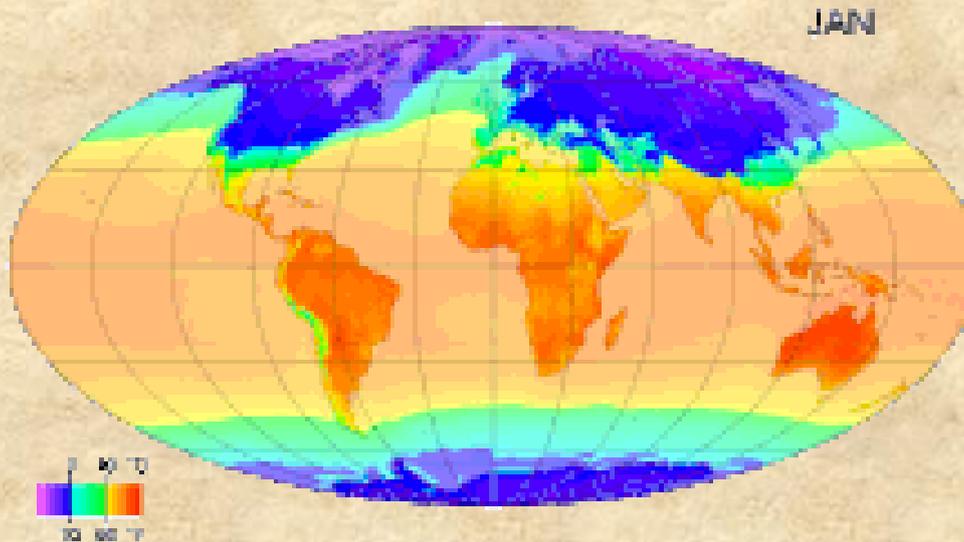
Causas das Mudanças Climáticas

O **clima** é uma média do clima atmosférico em uma escala de tempo desde que a Organização Meteorológica Mundial (OMM) padronizou em 30 anos. Os diferentes climas correspondem principalmente à latitude geográfica, altitude, distância ao mar, a orientação do relevo terrestre em relação à luz solar (vertente solar e úmbria) e à direção dos ventos (barlavento e sotavento) e, finalmente, correntes marinhas. Esses fatores e suas variações no tempo produzem mudanças nos principais elementos constituintes do clima: temperatura atmosférica, pressão atmosférica, ventos, umidade e precipitação.



Temperatura na superfície dos oceanos no verão de 2024 no hemisfério Sul.

(fonte: https://www.tercerainformacion.es/wp-content/uploads/2024/02/sst_world-wt3_2024_d035.png)



Animação do mapa do mundo da temperatura média mensal do ar da superfície.

Uma mudança na emissão de **radiação solar**, na composição da atmosfera, na disposição dos continentes, nas correntes marinhas ou na órbita da Terra pode modificar a distribuição de energia e equilíbrio térmico, alterando profundamente o clima, quando se trata de processos de longo prazo.

Em última análise, para que a **mudança climática global** ocorra, alguma força deve agir, ou seja, qualquer fator que afete o balanço energético do sistema climático, modificando a quantidade de energia que o sistema recebe do Sol ou a quantidade de energia que o sistema perde por emissão da Terra, para o espaço exterior. As forças podem ser variações nos parâmetros orbitais da Terra, no albedo terrestre, na concentração de gases de efeito estufa, na concentração de aerossóis, bem como nos de erupções vulcânicas, como as de origem antropogênica que vêm de atividades humanas, entre outras.

Outros fatores, como a distribuição dos continentes, podem acabar afetando algumas das forças e induzir as **mudanças climáticas globais**. Por exemplo, a ocupação do oceano equatorial por uma grande massa de terra, como aconteceu com o supercontinente de Rodínia, durante o Neoproterozoico, pode contribuir para uma maior reflexão da radiação solar, aumentando o albedo e produzindo um certo resfriamento que pode causar a formação de gelo que, por sua vez, aumenta o albedo, em um ciclo conhecido como *feedback* de albedo de gelo. A fragmentação de Rodínia, cerca de 700-800 milhões de anos atrás, foi capaz de expor mais crosta terrestre à erosão da chuva e fazer com que o Ciclo Geoquímico Carbonato-Silicato aumentasse o sequestro de CO₂ atmosférico, contribuindo para uma diminuição da temperatura que acabou induzindo uma glaciação global, mais conhecida como bola de neve.



A Terra virou uma bola de neve há 717 milhões de anos.

(fonte: <https://tm.ibxk.com.br/2024/02/08/08141247990273.jpg>)

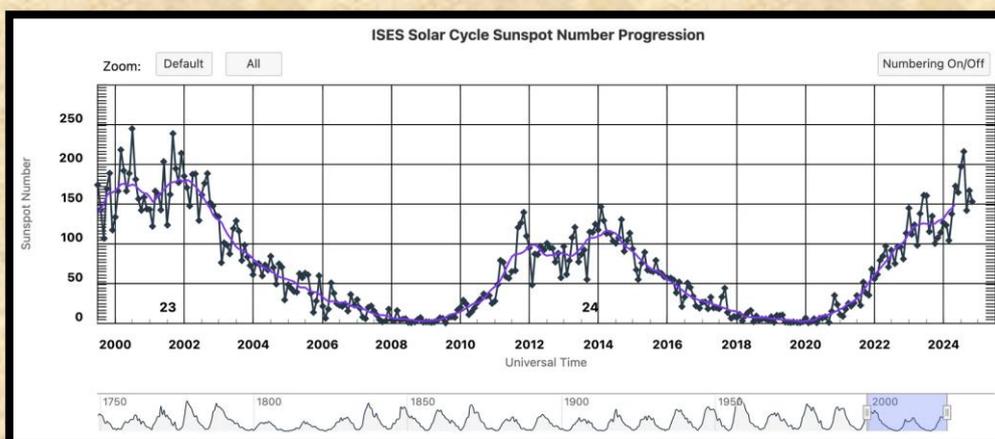
A atual **mudança climática** é muito provável que seja inteiramente antrópica e está relacionada principalmente à intensificação do efeito estufa devido às emissões industriais da queima de combustíveis fósseis. As prováveis contribuições de força natural e variabilidade interna para a mudança da temperatura global desde 1951 são insignificantes.

Influências externas

Variações solares

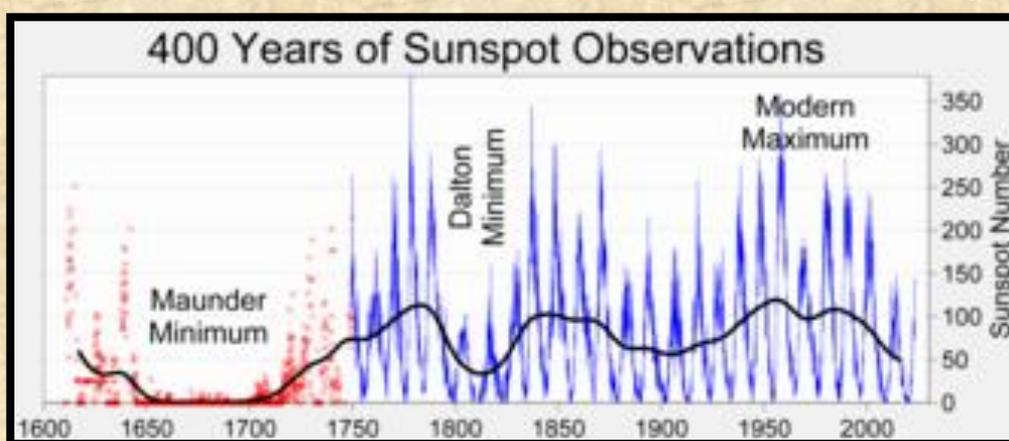
O Sol é uma estrela de aproximadamente 4,6 bilhões de anos de idade que emite radiação eletromagnética em todo o espectro de ondas desde ondas de rádio até o raios-X, embora 50% da energia seja emitida no visível e infravermelho. A emissão se ajusta excelentemente à de um corpo negro a 5770 K, temperatura característica de sua superfície visível (a fotosfera). Na distância da Terra (1 UA), a parte superior da atmosfera recebe um

brilho de 1361 W/m^2 que, devido à sua baixa variação de curto prazo, é historicamente conhecida como uma constante solar.



Ciclo solar – Progressão de manchas solares de 2000 a 2025.

(fonte: <https://www.diaadiadovale.com.br/wp-content/uploads/2024/12/yicMYBD9cqdxLDawtp88uT.png>)



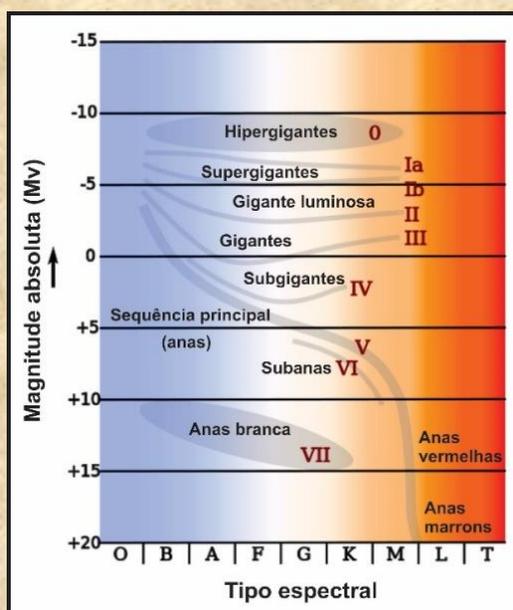
Quatrocentos anos de observações de manchas solares.

(fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Sunspot_Numbers.png/330px-Sunspot_Numbers.png)

O Sol tem ciclos de atividade de onze anos refletidos em sua superfície pelo número de manchas. Desde 1978 temos tido observações diretas da atividade solar e desde o início do século XVII, através de indicadores indiretos (proxies), do ciclo solar. A amplitude desses ciclos varia em torno de 0,1%, com períodos sem manchas solares, como o **Mínimo de Maunder** (1645 a 1715) que contribuiu para a chamada **Pequena Idade do Gelo** e períodos de maior atividade, como o **Máximo Solar Moderno**, centrados no final da década de 1950 e cuja amplitude ainda está em discussão.

A **temperatura média da Terra** depende, em grande parte, do fluxo de radiação solar que recebe. No entanto, como esse suprimento de energia dificilmente varia ao longo do tempo, não é considerado uma contribuição importante para a variabilidade climática de curto prazo, em comparação com o efeito dos gases de efeito estufa. Isso acontece porque o Sol é uma estrela do **tipo G** na fase da sequência principal, provando ser muito estável. O fluxo de radiação também é o motor dos fenômenos atmosféricos, pois fornece a energia

necessária para a atmosfera para que eles possam produzir. Variações na irradiância solar, portanto, não contribuíram para a mudança climática nas últimas décadas.

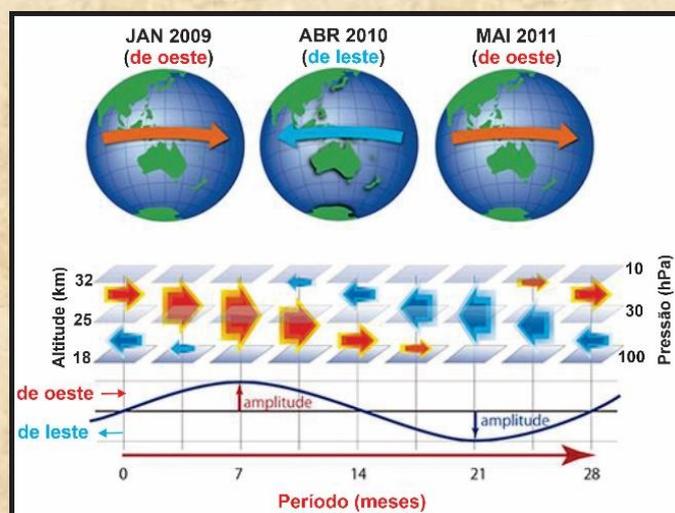


Classificação espectral das estrelas segundo o Diagrama Espectral de Hertzsprung-Rusell.

(modificado: <https://physicsanduniverse.com/wp-content/uploads/2013/06/Yerkes-spectral-classification.png>)

Variações de **radiação solar** são, no entanto, mais pronunciadas no ultravioleta próximo, por isso seria esperado que o ciclo solar afetasse à estratosfera através da absorção da camada de ozônio. Esta influência na temperatura e concentração de ozônio tem sido de fato observada na estratosfera, tanto em latitudes médias como tropicais.

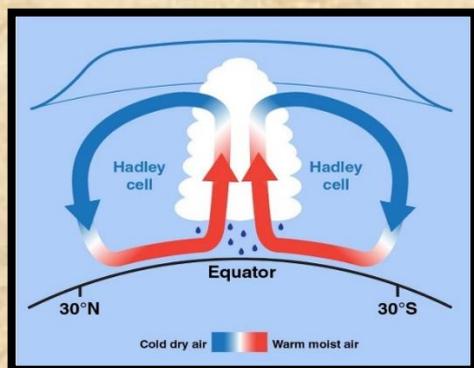
Não é a única conexão estabelecida entre o Sol e o clima. Um dos resultados mais robustos é a variação de temperatura da estratosfera polar, quando os dados estão relacionados com a fase de **Oscilação Quase Bienal** (QBO), uma oscilação do vento na baixa estratosfera com um período médio de 28 a 29 meses.



Oscilação Quase Bienal que corresponde a uma variação regular dos ventos que sopram bem acima do equador.

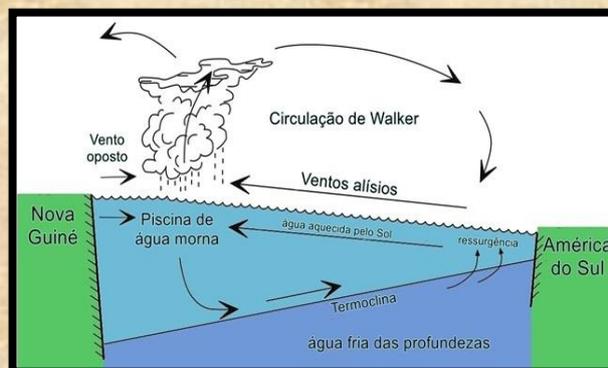
(modificado: <https://pbs.twimg.com/media/D6RJ-KCWwAA0UBq.jpg>)

Outros estudos encontram alguma influência sobre a troposfera, os oceanos e a superfície continental. Há, por exemplo, alguma evidência da amplificação, no topo do ciclo solar, da precipitação tropical máxima, com um alargamento da circulação de Hadley e um fortalecimento da circulação de Walker no Pacífico equatorial ligado aos ciclos do *El Niño-La Niña* (ENSO).



Circulação de Hadley

(fonte: https://services.meteored.com/img/article/que-es-la-celula-de-hadley-y-por-que-preocupa-tanto-a-los-meteorologos-espanoles-1706773577728_1280.jpg)



Circulação de Walker

(fonte: <https://surfguru.space/2017/02/170213071403000000.jpg>)

No que diz respeito ao aquecimento global do século passado, estudos de detecção e atribuição estatísticos encontram influência solar na primeira metade do século XX, mas não na segunda, perfeitamente consistente com a constância da irradiância solar após 1980.

Uma hipótese popular relaciona as variações no campo magnético solar às mudanças no clima, criando núcleos de condensação por ionizações causadas por raios cósmicos. No momento de maior atividade solar, o campo magnético é intensificado, o que limita a quantidade de raios cósmicos que atingem a atmosfera e, portanto, a criação de núcleos de condensação, formando menos nuvens e aumentando a quantidade de luz solar alcançada na superfície. Desta forma indireta, a parte superior do ciclo solar causa maior aquecimento da superfície. No entanto, os dados disponíveis não suportam esta ligação.

A longo prazo, o Sol aumenta sua luminosidade a uma taxa de 10% a cada bilhão de anos, o que muda enormemente o clima através das eras.

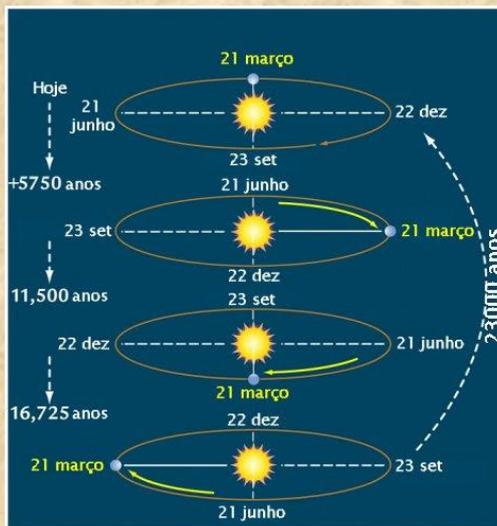
Variações orbitais

Embora a luminosidade solar permaneça praticamente constante ao longo de milhões de anos, o mesmo não é verdade para a **órbita da Terra**. Essa oscila periodicamente, fazendo com que a quantidade média de radiação recebida em cada hemisfério flutue ao longo do tempo, e essas variações causam pulsos glaciais como verões e invernos de longo período. Estes são os chamados glaciares e períodos interglaciais.

Existem três fatores que ajudam a modificar as características orbitais, fazendo com que a luz solar média em ambos os hemisférios varie, mesmo que não o faça apenas o fluxo

da radiação global. É a **precessão dos equinócios**, a **excentricidade orbital** e a **obliquidade da órbita** ou inclinação do eixo da Terra. Apenas a excentricidade pode alterar ligeiramente o fluxo de radiação global, em menos de 0,2%.

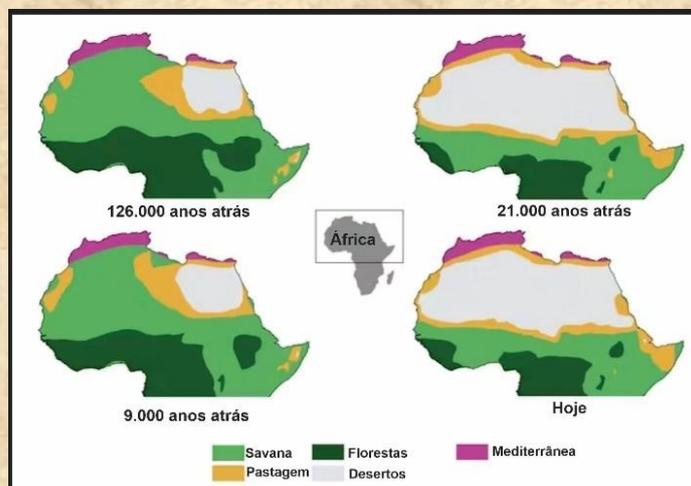
O **periélio atual** coincide muito de perto com o **solstício de dezembro**, mas é apenas uma coincidência temporária. O eixo de rotação da Terra descreve uma circunferência ao longo de um período de cerca de 26.000 anos. É o fenômeno bem conhecido da **precessão dos equinócios**.



Efeitos da precessão nas estações.

(fonte: https://lh6.googleusercontent.com/proxy/SZTz87ohn_f0mlTA0JbaRc63g2BYS49jFKxink5PV2X9z1IAcCwboVAmDBOcoB0pwO65qz27upQnkeGZmtZW)

A **órbita da Terra** também está sujeita ao seu próprio movimento de precessão do periélio causado pela influência gravitacional de Júpiter e Saturno, principalmente, com um período de cerca de 112 mil anos. Tanto o movimento, a precessão dos equinócios como o periélio, combinam-se para provocar a tradução do periélio em relação às estações em dois ciclos, um dominante de 23 000 e o outro menos acusado de 19 000 anos.

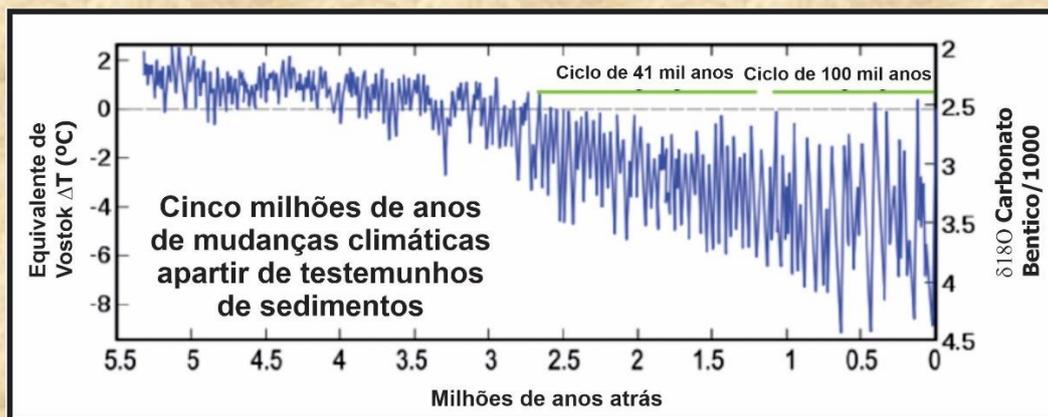


O deserto do Saara já foi uma Saara a milhares de anos.

(modificado: https://services.meteored.com/img/article/o-deserto-do-saara-ja-uma-savana-verde-ha-muitos-anos-atras-1703081123510_1280.jpg)

Essas variações orbitais poderiam ter sua relevância em tempos históricos e constituir um dos gatilhos do **Holoceno Climate Optimum** a cerca de 6000 anos atrás, quando o verão do hemisfério norte estava na parte da órbita perto do periélio. O aumento da quantidade de radiação incidente sobre o norte da África também ajudou a aumentar as chuvas de monções e criar, como resultado, um Saara verde e úmido cerca de 10.000 anos atrás.

A situação começou a mudar significativamente há cerca de 5000 anos, quando o inverno começou a se aproximar do periélio, causando uma tendência progressiva ao resfriamento que parece ter sido encontrada nos indicadores dos últimos dois milênios.



Variações dos ciclos glaciais indicados pelos sedimentos oceânicos.

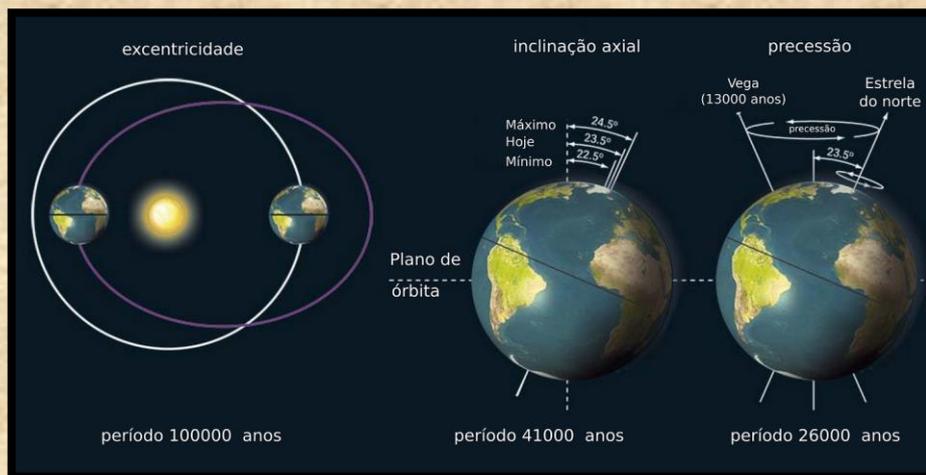
(modificado: <https://www.researchgate.net/publication/282393775/figure/fig7/AS:312287949803534@1451466657501/Five-million-years-of-climate-change-reconstructed-with-sediment-cores.png>)

A periodicidade do **ciclo de precessão** também controlou as variações climáticas a vários milhões de anos antes dos últimos 3 milhões de anos. A partir desse momento, um novo ciclo muito estável de 41.000 anos começou a iniciar as grandes glaciações do hemisfério norte aparentemente causadas por variações da obliquidade do eixo de rotação entre 22 e 24,5°. O fator-chave proposto que afeta o avanço e a retirada das geleiras é a insolação sobre o hemisfério norte integrado durante o verão, em lugar do máximo ou da média de insolação. Os modelos numéricos, no entanto, continuam a mostrar uma clara influência da precessão, de modo que a explicação do ciclo de 41.000 anos, nos períodos glaciais da primeira metade do Pleistoceno, parece resistir a uma explicação definitiva.

Misteriosamente, uma vez que ainda não temos certeza das causas, esses ciclos glaciais mudaram a uma frequência de cem mil anos nos últimos milhões de anos ou mais. O mistério vem do fato de que, embora as variações na excentricidade da órbita da Terra apresentem uma periodicidade de 100 mil anos (mais um segundo ciclo de 405 mil anos), a variação de insolação produzida de muito menos magnitude do que a causada pelos outros movimentos orbitais do nosso planeta. Numerosas soluções foram propostas, mas agora é considerado um problema não resolvido.

Os três ciclos de insolação causados pelos diferentes movimentos orbitais são conhecidos como **Ciclos de Milankovitch** e foram descobertos de forma pioneira na década de 1870 pelo escocês James Croll. Anteriormente, em 1842, Joseph Adhémar já havia

adivinhado que a precessão da órbita da Terra era a causa das eras glaciais. Os cálculos de Croll foram aperfeiçoados independentemente na década de 1920 pelo astrônomo sérvio **Milutin Milankovi**. Trinta anos depois, três pesquisadores usaram registros climáticos dos últimos 450 mil anos, a partir da análise de sedimentos marinhos, para testar a hipótese. Em 1976, eles publicaram na revista Science um artigo confirmando a conexão entre a mudança de insolação causada a 65°N devido aos ciclos orbitais e às eras glaciais do Quaternário. Esta conexão foi estendida até 1,4 bilhão de anos atrás, durante o Proterozoica, embora a verdade seja que não existe uma teoria consolidada do mecanismo que amplifica o efeito da luz do sol para produzir ciclos glaciais.



Ciclo de Milankovitch

(fone: https://miro.medium.com/v2/resize:fit:1400/0*T871rttYmfmJaK7u.png)

Variações orbitais têm sido intimamente ligadas à evolução dos hominídeos através do clima africano.

O estudo do papel dessas **variações orbitais** será fundamental para a compreensão do clima futuro. A variação dos parâmetros orbitais faria com que o fim do atual interglacial aguardasse dentro dos próximos 10 milênios se as emissões de CO₂ fossem mantidas em níveis pré-industriais (menos de 300 ppmv). Com o aumento das emissões industriais, a conclusão do interglacial não ocorrerá mais provavelmente nos próximos 50 mil anos.

O impacto dos meteoritos

Raramente ocorrem eventos catastróficos que mudam a face da Terra para sempre. Estes são os impactos de grandes **meteoritos**. O último desses eventos globalmente catastróficos e bem documentado, o evento Chicxulub (em Yucatán, México) conhecido como o **impacto K/T**, ocorreu há 66 milhões de anos e causou uma extinção maciça que acabou com muitas espécies, além dos dinossauros. A causa, um asteroide de cerca de 10 km de diâmetro, criou uma cratera de cerca de 200 km e colocou em jogo uma energia em torno

de um bilhão de megatons, equivalente, em ordem de magnitude, a energia que nosso planeta recebe do Sol por um ano inteiro. Sem dúvida, tais fenômenos podem ter um efeito devastador sobre o clima, liberando grandes quantidades de aerossóis (principalmente como óxidos de enxofre que produzem ácido sulfúrico), poeira, vapor de água e CO₂ para a atmosfera devido à ejeção de materiais, tanto do próprio objeto quanto da superfície da Terra, e aos incêndios causados pelo impacto.



Impacto do K/T no Golfo do México

(fonte: <https://rubenyencia.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/03/impacto1.jpg>)

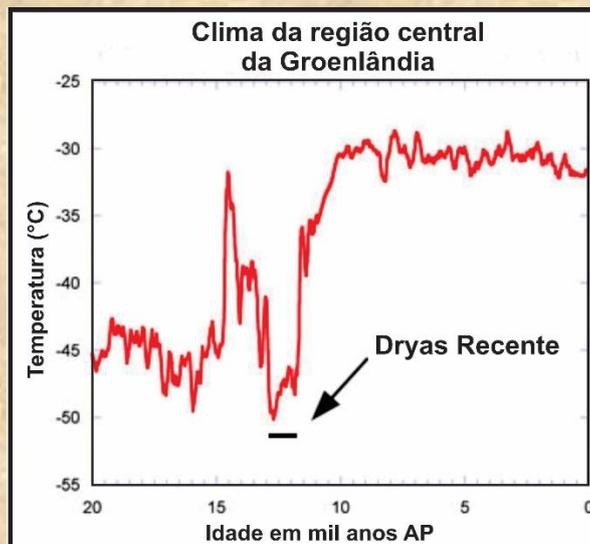
O modelo climático clássico proposto após o **impacto K/T** consiste na liberação inicial de poeira e dióxido de enxofre, criando uma redução na luz solar de até 20% na primeira década e um resfriamento global por mais uma década a temperaturas que poderiam estar abaixo do ponto de congelamento, um cenário comumente chamado de **inverno nuclear**.

Posteriormente, dominaria o aumento do **efeito estufa** causado pelo CO₂ da rocha carbonatada pulverizada durante o impacto. A magnitude dessas emissões foi estimada em aproximadamente uma década de emissões industriais atuais, primeiro induzindo um ligeiro aquecimento global e, em seguida, um aquecimento significativo a longo prazo (cerca de cem mil anos), dos quais há evidências recentes. Mas poderia haver outros mecanismos que causam o aquecimento e a distinção entre os efeitos da queda das bolas de fogo e a atividade vulcânica em massa são difíceis de diferenciar sem datação precisa de eventos.

Pelo menos dois eventos climáticos significativos foram inferidos com a queda do asteroide. Um deles poderia corresponder à extinção em massa no Permiano-Triássico que ocorreu há 252 milhões de anos. Várias crateras foram associadas a este evento, embora a cratera **Araguainha** (Brasil) de 40 km de diâmetro pareça, por enquanto, ser a melhor candidata, considerado que essa, com a idade de 250 a 256 milhões de anos, se sobrepõe à data de extinção em massa. Este tamanho da cratera não deve causar efeitos convencionais duradouros, mas um mecanismo alternativo que consiste na produção de terremotos em grande escala (9-10 na escala Richter) foi proposto agindo em escala continental e afetando

depósitos de areia betuminosa e rochas ricas em materiais orgânicos, o que causaria emissões significativas de metano e, conseqüentemente, mudanças climáticas abruptas.

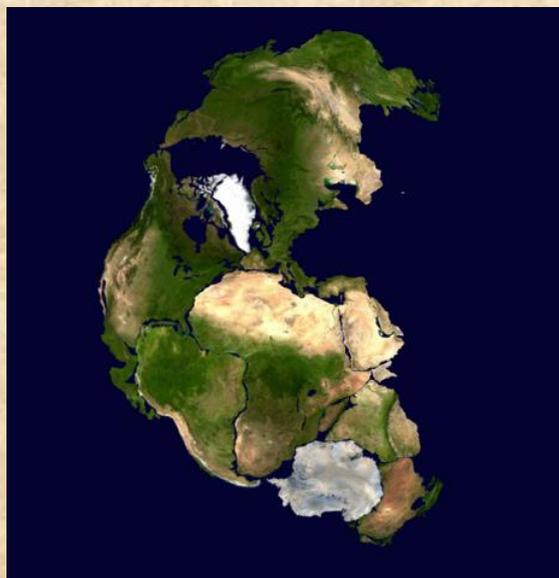
A outra mudança climática associada a um possível impacto da bola de fogo poderia ter ocorrido muito mais recentemente, pouco antes do início do Holoceno. A recente descoberta de uma cratera de 31 km de diâmetro sob o gelo da **Groenlândia**, correspondendo a uma bola de fogo de 1,5 km de diâmetro, reabriu o caso da hipótese de impacto sobre o evento climático conhecido como **Dryas Recente**, um resfriamento súbito que ocorreu a cerca de 12.800 anos atrás, aparentemente apoiado por um acúmulo de novas evidências físicas. A cratera, no entanto, não foi datada, embora se estima que tenha ocorrido nos últimos 100 mil anos, modo que o debate permanece aberto.



Clima da região central da Groenlândia nos últimos 20 mil anos.

(modificado: https://cdn.serc.carleton.edu/images/eslabs/cryosphere/younger_dryas_graph.webp)

Influências internas



Visualização da Pangeia.

(fonte: https://content.oxfordhomeschooling.co.uk/wp-content/uploads/Pangea_modern.png?x65556)

A **deriva continental** e o clima são processos relacionados já que a oposição dos continentes é um fator determinante na conformação do clima mundial. A Terra passou por muitas mudanças desde a sua origem, há 4,6 bilhões de anos. Há 225 milhões de anos todos os continentes estavam unidos, formando o que é conhecido como **Pangeia** e existia um oceano universal chamado **Pantalassa**.

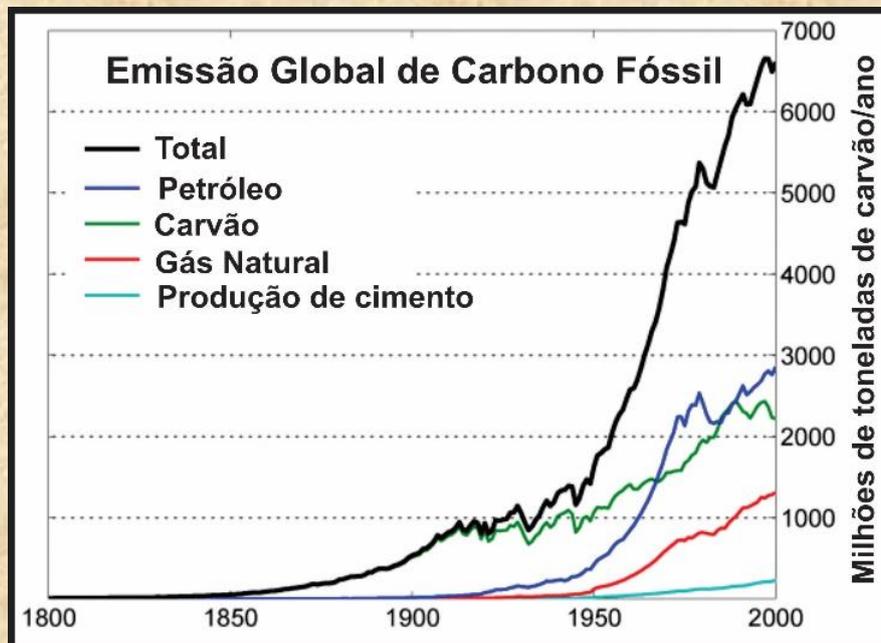
As placas tectônicas separaram os continentes e os colocaram na situação atual. O oceano Atlântico vem se formando há 200 milhões de anos. A **deriva continental** é um processo extremamente lento, por isso a posição dos continentes fixa o comportamento do clima durante milhões de anos. Há dois aspectos a ter em conta. Por um lado, as latitudes em que se concentra a massa continental: se as massas continentais se situarem em baixas latitudes, haverá poucos glaciares continentais e, em geral, temperaturas médias menos extremas. Da mesma forma, se os continentes estiverem muito fragmentados, haverá menos continentalidade. Estes aspectos podem contribuir de diversas formas contraditórias para a evolução do clima.

Um processo que demonstra a influência a longo prazo da **deriva continental** no clima é a existência de depósitos de carvão nas ilhas Svalbard ou Spitzbergen, numa latitude onde já não existem árvores devido ao clima demasiado frio: a ideia que explica estes depósitos é que o movimento da placa onde estas ilhas estão localizadas, ocorreu em direção ao norte a partir de um local mais a sul com um clima mais quente.



Ilhas Svalbard ou Spitsbergen – Noruega.

(fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/SVALBARD.jpg>)



Emissões globais de dióxido de carbono segundo sua origem.

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Global_Carbon_Emission_by_Type.png)

A **atmosfera primitiva**, cuja composição era semelhante à nebulosa inicial, perdeu seus componentes mais leves, o hidrogênio diatômico (H_2) e o hélio (He), para ser substituído por gases provenientes das emissões vulcânicas do planeta ou seus derivados, especialmente o dióxido de carbono (CO_2), dando origem a uma atmosfera de segunda geração. Nesta atmosfera, os efeitos dos **gases de efeito estufa**, emitidos naturalmente pelos vulcões, são importantes. Por outro lado, a quantidade de óxidos de enxofre (SO , SO_2 e SO_3) e outros aerossóis, emitidos pelos vulcões, contribuem para o oposto, para o **arrefecimento da Terra**. Um determinado equilíbrio radiativo resulta do equilíbrio entre ambos os efeitos.

Com o surgimento da vida na Terra se adicionou como agente incidente o total de organismos vivos, a **biosfera**. Inicialmente, os organismos autotróficos capturaram grande parte do CO_2 abundante da atmosfera primitiva através da fotossíntese ou quimiossíntese, enquanto o oxigênio começou a se acumular (a partir do processo abiótico de fotólise da água). O surgimento da fotossíntese oxigenada, realizada pelas **cianobactérias** e seus descendentes, os **plastídios**, deu origem a uma presença massiva de oxigênio (O_2) como a que caracteriza a atmosfera atual, e ainda maior. Esta modificação da composição da atmosfera levou ao surgimento de novas formas de vida aeróbicas que aproveitaram a nova composição do ar. Assim, o consumo de oxigênio aumentou e o consumo líquido de CO_2 diminuiu, atingindo o equilíbrio ou clímax, formando assim a atual atmosfera de terceira geração. Este delicado equilíbrio entre o que é emitido e o que é absorvido fica evidente no ciclo do CO_2 , cuja presença flutua ao longo do ano dependendo das épocas de crescimento das plantas.



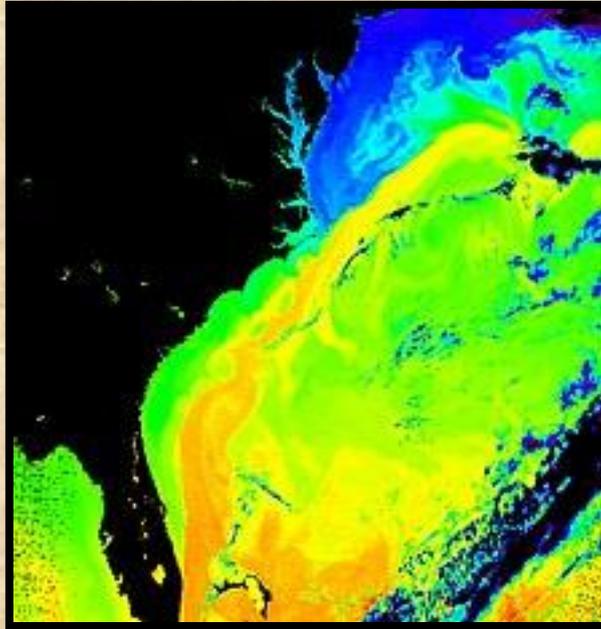
Ciclo do carbono.

(fonte: <https://cdn.kastatic.org/ka-perseus-images/4a170aef36887fe101bf251fdfce5796aa2a4bfa.png>)

Correntes oceânicas

Temperatura da água na Corrente do Golfo.

As **correntes oceânicas**, ou correntes marítimas, são fatores reguladores do clima que atuam como moderadores, amenizando as temperaturas em regiões como a Europa e as costas ocidentais do Canadá e do Alasca. A climatologia estabeleceu claramente os limites térmicos dos diferentes tipos climáticos que se mantiveram ao longo de todo esse tempo. Não se fala muito sobre os limites de precipitação desse clima porque as culturas tradicionais mediterrânicas são ajudadas pela irrigação e quando se trata de culturas de sequeiro, apresentam-se em parcelas mais ou menos planas (cultivo em terraços) para tornar as chuvas mais eficazes, promovendo a infiltração no solo. Além disso, as culturas típicas do matagal mediterrânico estão adaptadas a alterações meteorológicas muito mais intensas do que as registadas nos últimos tempos: se assim não fosse, os mapas dos diferentes tipos climáticos teriam de ser refeitos: um aumento de cerca de 2°C na bacia do Mediterrâneo significaria a possibilidade de aumentar a latitude de muitas culturas cerca de 200 km mais a norte (como a cultura da laranja). É claro que esta ideia seria inviável do ponto de vista económico, uma vez que a produção de laranja é excedentária há já algum tempo, não devido ao aumento do cultivo em latitudes mais elevadas (o que corroboraria de alguma forma a ideia de aquecimento global), mas devido ao desenvolvimento da referida cultura em áreas recuperadas do deserto (Marrocos e outros países) graças à irrigação por gotejamento e outras técnicas de cultivo.

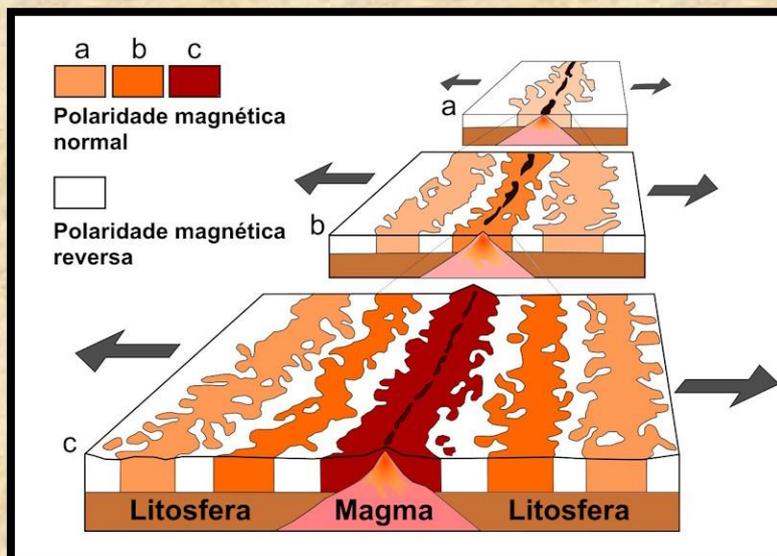


Corrente quente do Golfo

(fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/63/Gulf_Stream_water_temperature.jpg/220px-Gulf_Stream_water_temperature.jpg)

Campo magnético terrestre

Da mesma forma que o **vento solar** pode afetar diretamente o clima, as variações no **campo magnético** da Terra podem afetá-lo indiretamente, pois, dependendo do seu estado, ele interrompe ou não as partículas emitidas pelo Sol. Está comprovado que em épocas passadas ocorreram inversões de polaridade e grandes variações em sua intensidade, tornando-se quase nulas em alguns momentos. Sabe-se também que os polos magnéticos, embora tendam a estar próximos dos polos geográficos, por vezes aproximam-se do Equador. Esses eventos influenciaram a forma como o vento solar atingiu a atmosfera da Terra.



Paleomagnetismo terrestre.

(fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7e/Oceanic.Stripe.Magnetic.Anomalies.Scheme.svg/291px-Oceanic.Stripe.Magnetic.Anomalies.Scheme.svg.png>)

Atividade humana

O **impacto ambiental**, também conhecido como impacto antrópico ou impacto antropogénico, é a alteração ou modificação causada por uma ação humana sobre o ambiente. Porque todas as ações humanas têm de alguma forma impacto no ambiente, um impacto ambiental é diferenciado de um simples efeito no ambiente através de uma avaliação que permite determinar se a ação realizada (por exemplo, um projeto) é capaz de alterar a qualidade ambiental e assim justificar a designação de impacto ambiental.



Exemplo de impacto ambiental: Desmatamento na Amazônia

(fonte: https://www.iberdrola.com/documents/20125/1226512/Deforestacion_Amazonia_746x419.jpg/5dce363b-66c6-9792-718c-327381ef5dcf?t=1639125352131)



Exemplo de impacto ambiental: Queimadas no Pantanal.

(fonte: <https://blogs.correiobraziliense.com.br/4elementos/wp-content/uploads/sites/53/2020/08/queimadas.jpg>)

Retroalimentação

O **gelo marinho**, mostrado aqui na figura abaixo, relativo à região de Nunavut (norte do Canadá), reflete mais luz solar, enquanto no ambiente de mar aberto, esse absorve mais, acelerando o derretimento.



Região de Nunavut – Norte do Canadá.

(fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Kaparoqtaalik_Glacier_1_1997-08-06.jpg)

A **retroalimentação** (*feedback*) sobre as alterações climáticas é o processo de *feedback* através do qual uma mudança no clima pode facilitar ou dificultar futuras mudanças.

O sistema climático inclui uma série de *feedbacks* que alteram a resposta do sistema a mudanças nas forças externas. Os *feedbacks* positivos aumentam a resposta do sistema climático a uma forçante inicial, enquanto os *feedbacks* negativos a reduzem. Os dois fenômenos podem ocorrer ao mesmo tempo e algum tipo de mudança mais ou menos abrupta e imprevisível, a longo prazo emergirá do equilíbrio geral, uma vez que o sistema climático é um sistema caótico e complexo.

Há uma série de *feedbacks* no **sistema climático**, incluindo vapor de água, mudanças no gelo e seu efeito albedo (a neve e a cobertura de gelo afetam a quantidade que a superfície da Terra absorve ou reflete a luz solar, as nuvens e as mudanças no ciclo de carbono da Terra (por exemplo, a liberação de carbono do solo). O principal *feedback* negativo é a energia que a superfície da Terra irradia para o espaço na forma de radiação infravermelha. De acordo com a lei de Stefan-Boltzmann, se a temperatura absoluta (medida em Kelvin) duplicar, a energia radiativa aumenta por um fator de 16 (2 elevados à quarta potência).

As retroalimentações são um fator importante na determinação da sensibilidade de sistema climático a um aumento das concentrações atmosféricas dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Se o resto se mantém, uma maior sensibilidade climática significa que ocorrerá mais

aquecimento para o mesmo aumento na forçante de gases de efeito estufa. A incerteza sobre o efeito dos *feedbacks* é uma razão importante pela qual diferentes modelos climáticos projetam diferentes magnitudes de aquecimento para um determinado cenário de forçante. São necessárias mais pesquisas para compreender o papel dos *feedbacks* das nuvens e do ciclo do carbono nas projeções climáticas.

As projeções do IPCC mencionadas aparecem na faixa **“provável”** (probabilidade superior a 66%, com base na opinião de especialistas) para os cenários de emissões selecionados. No entanto, as projeções do IPCC não refletem toda a gama de incerteza. O limite inferior do intervalo **“provável”** parece estar mais limitado do que o seu limite superior.

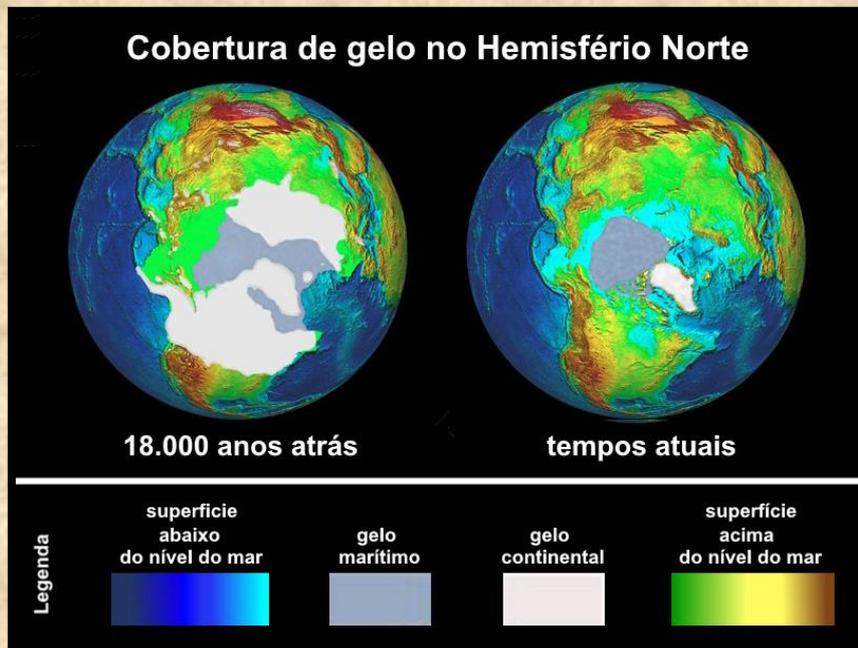
Incerteza de previsão

Deve ser destacada a existência de **incertezas** (erros) na previsão dos modelos. A razão para a maioria destes erros é que muitos processos importantes de pequena escala não podem ser representados explicitamente em modelos, mas devem ser aproximadamente incluídos quando interagem em escalas maiores. Isto deve-se em parte a limitações na capacidade de processamento, mas é também o resultado de limitações no conhecimento científico ou da disponibilidade de observações detalhadas de alguns processos físicos. Em particular, existem níveis consideráveis de incerteza associados à representação das nuvens e às respostas correspondentes das nuvens às alterações climáticas.

Edward N. Lorenz, um investigador climático, encontrou uma **teoria revolucionária do caos** que é hoje aplicada nas áreas da economia, biologia e finanças (e outros sistemas complexos). No modelo numérico, o estado do futuro é calculado com dados de observações meteorológicas (temperatura, precipitação, vento, pressão) atuais e utilizando o sistema de equações diferenciais. Segundo Lorenz, se houver pequenas tolerâncias na observação meteorológica (dados de entrada), no processo de cálculo da previsão a tolerância cresce drasticamente. A previsibilidade (duração confiável da previsão) é de no máximo sete dias para ser discutida quantitativamente in situ (em escala local). Quanto mais aumenta a duração das integrações (7 dias, 1 ano, 30 anos, 100 anos), maior é a incerteza do resultado da previsão. No entanto, a técnica **“ensemble”** (cálculo da média de vários resultados do modelo com diferentes entradas) reduz a incerteza e de acordo com a comunidade científica, através desta técnica o estado da média mensal pode ser discutido qualitativamente. Ao discutir a quantidade de precipitação, temperatura e outros, deve-se ter a ideia da existência da incerteza e da propriedade caótica do clima. Ao mesmo tempo, para a tomada de decisões políticas relacionadas com a questão das alterações climáticas, é importante considerar um critério multimodelo.

Mudanças climáticas no passado

A **paleoclimatologia** estuda as características climáticas da Terra ao longo de sua história e pode ser incluída como parte da paleogeografia. Estuda as grandes variações climáticas, suas causas, e dá a descrição mais precisa possível das características do clima que ocorre num determinado momento da história da Terra. A variação à escala geológica dos fatores que determinam o clima atual, como a energia da radiação solar, a situação astronômica e a radiação cósmica, o relevo e distribuição dos continentes e oceanos, e a composição e dinâmica da atmosfera, constituem os fatores mais utilizados na dedução e explicação dos **paleoclimas**.



Paleoclimatologia – o clima do passado geológico.

(fonte: [https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgY5QTEaPINZ6Fxcn4VozbYIkFoCVCnRJYijX80KHtv-MHBhbZD8qaalxn5bwdxe45moQYFMnnHzNgnEHct7EHb68i4TkkIM3kTBtZK-faXbw2oe0xxU-](https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgY5QTEaPINZ6Fxcn4VozbYIkFoCVCnRJYijX80KHtv-MHBhbZD8qaalxn5bwdxe45moQYFMnnHzNgnEHct7EHb68i4TkkIM3kTBtZK-faXbw2oe0xxU-0YPeZsFxcK56C9X05fX6z1xgYOcHkl7lckHNfMGCHc2aJgXyZq8wRSINCBnhAekulQgPYgNY/s800/cobertura_de_gelo_no_hemisferio_norte_18000-atual.jpg)

[0YPeZsFxcK56C9X05fX6z1xgYOcHkl7lckHNfMGCHc2aJgXyZq8wRSINCBnhAekulQgPYgNY/s800/cobertura_de_gelo_no_hemisferio_norte_18000-atual.jpg](https://blogger.googleusercontent.com/img/b/R29vZ2xl/AVvXsEgY5QTEaPINZ6Fxcn4VozbYIkFoCVCnRJYijX80KHtv-MHBhbZD8qaalxn5bwdxe45moQYFMnnHzNgnEHct7EHb68i4TkkIM3kTBtZK-faXbw2oe0xxU-0YPeZsFxcK56C9X05fX6z1xgYOcHkl7lckHNfMGCHc2aJgXyZq8wRSINCBnhAekulQgPYgNY/s800/cobertura_de_gelo_no_hemisferio_norte_18000-atual.jpg))

Os estudos do clima passado (**paleoclima**) são realizados através do estudo de registros fósseis, acumulações de sedimentos nos fundos marinhos, bolhas de ar capturadas em geleiras, marcas de erosão nas rochas e marcas de crescimento de árvores. Com base em todos estes dados, foi possível criar uma história climática recente relativamente precisa e uma história climática pré-histórica com menos precisão. À medida que recuamos no tempo os dados são reduzidos e a certa altura a **climatologia** utiliza apenas modelos de previsão do futuro e do passado.

Paradoxo do Sol Fraco

A partir de modelos de evolução estelar, a variação de longo prazo do brilho solar pode ser calculada com relativa precisão, por isso se sabe que, nos primeiros momentos da existência da Terra, o Sol emitia 70% da energia atual e a temperatura de equilíbrio era de -41°C . No entanto, existem evidências da existência de oceanos e de vida há 3,8 bilhões de anos, pelo que o paradoxo do Sol fraco só pode ser explicado por uma atmosfera com uma concentração de CO_2 muito superior à atual e com um efeito de estufa maior.

O Efeito Estufa no Passado

A **atmosfera** influencia fundamentalmente o clima; se não existisse, a temperatura na Terra seria de -20°C , mas a atmosfera se comporta de maneira diferente dependendo do comprimento de onda da radiação. O Sol, devido à sua alta temperatura, emite radiação de no máximo 0,48 micrômetros (lei de Wien) e a atmosfera permite a passagem da radiação. A Terra tem uma temperatura muito mais baixa e reemite a radiação absorvida num comprimento de onda infravermelho muito maior, cerca de 10 a 15 micrômetros, no qual a atmosfera já não é transparente. O CO_2 , que em março de 2017 ultrapassava os 405 ppm na atmosfera, absorve esta radiação. O mesmo acontece, e em maior quantidade, com o vapor de água. O resultado é que a atmosfera aquece e devolve parte dessa energia para a Terra, de modo que a temperatura da superfície é de cerca de 15°C , e está longe do valor de equilíbrio sem atmosfera. Este fenômeno é chamado de efeito estufa.



Variação da concentração de CO_2 na atmosfera.

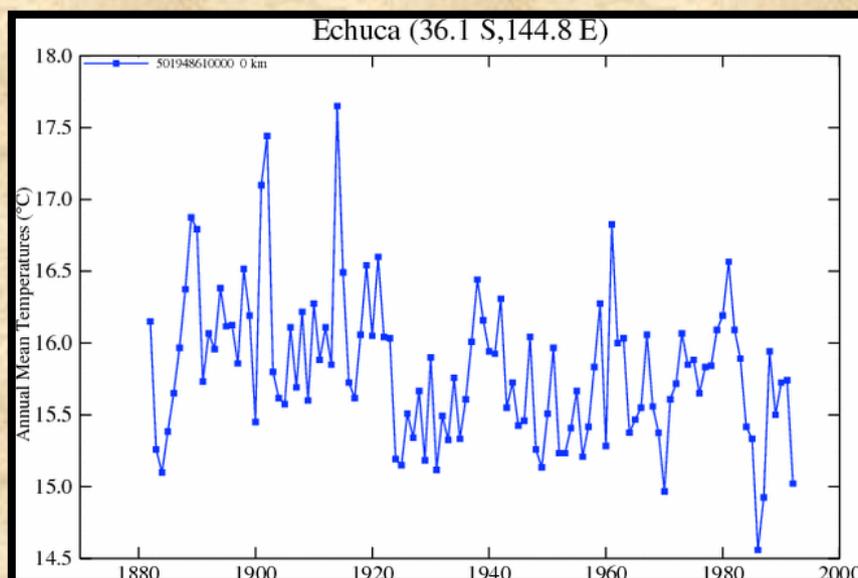
(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/CO2-variations_hg.png)

A concentração anterior de **CO₂** e de outros gases importantes de efeito estufa, como o metano, foi medida a partir de bolhas presas no gelo e em amostras de sedimentos marinhos, e observou-se que flutuou ao longo dos tempos. As causas exatas pelas quais essas diminuições e aumentos ocorreriam são desconhecidas, embora existam várias hipóteses em estudo. O balanço é complexo porque, embora sejam conhecidos os fenômenos que captam o CO₂ e os que o emitem, a interação entre estes e o balanço final é difícil de calcular.

Existem alguns casos conhecidos em que o **CO₂** desempenhou um papel importante na história do clima. Por exemplo, no Proterozóico, uma queda significativa nos níveis atmosféricos de **CO₂** levou aos chamados episódios da **Terra Bola de Neve**. Da mesma forma, aumentos significativos de **CO₂** levaram, durante o período de extinção em massa do Permiano-Triássico, ao aquecimento excessivo da água do mar, o que levou à emissão de metano preso em depósitos de hidrato de metano encontrados no fundo do mar; este fenômeno acelerou ao limite o processo de aquecimento e levou a Terra à pior extinção em massa que alguma vez sofreu.

Dióxido de Carbono como regulador do clima

Durante as últimas décadas, medições em diferentes estações meteorológicas indicam que o planeta tem vindo a **aquecer**. Os últimos 10 anos foram os mais quentes já registados e alguns cientistas preveem que no futuro será ainda mais quente. A grande maioria dos especialistas concordam que este processo tem origem antropogênica, geralmente conhecido como efeito estufa. À medida que o planeta **aquece**, o gelo nas montanhas e nas regiões polares diminui globalmente; por exemplo, o gelo marinho do Ártico ou a calota polar da Groenlândia fazem isso. Paradoxalmente, a extensão do gelo Antártico, conforme previsto pelos modelos, aumenta ligeiramente.



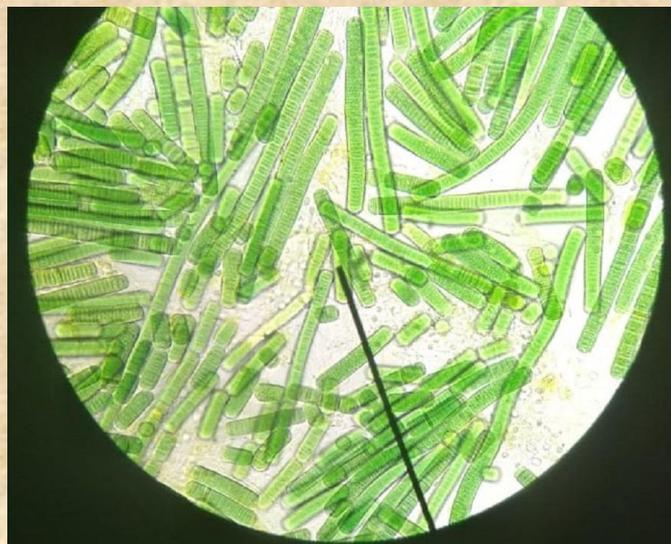
Temperatura média anual na estação meteorológica de Echuca/Austrália, entre 1881-1992.

(fonte: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/NASA_T%C2%BA_1881-1992_Echuca%2C_Australia.gif)

Como a neve tem um **albedo alto**, ela devolve para o espaço a maior parte da radiação que incide sobre ela. A diminuição destes limites afetará, portanto, também o albedo terrestre, o que fará com que a Terra aqueça ainda mais. Isso produz o que é chamado de “**efeito amplificador**”. Da mesma forma, um aumento na nebulosidade devido ao aumento da evaporação contribuirá para um **aumento no albedo**. O derretimento do gelo também pode cortar as correntes marítimas do Atlântico Norte, provocando uma queda local nas temperaturas médias daquela região. O problema é difícil de prever, pois, como se pode verificar, existem *feedbacks* positivos e negativos.

Aparece a vida na Terra

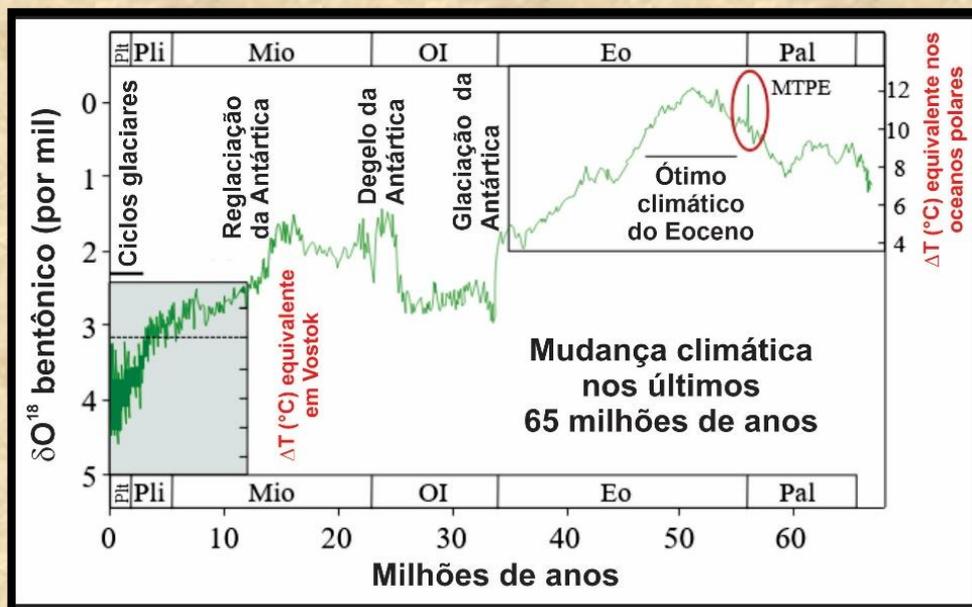
Com o aparecimento das **cianobactérias** na Terra, iniciou-se a fotossíntese oxigenada. As algas, e mais tarde também as plantas, absorvem e fixam CO_2 e emitem O_2 . Seu acúmulo na atmosfera favoreceu o surgimento de organismos aeróbicos que o utilizam para respirar e devolver CO_2 . O O_2 numa atmosfera é o resultado de um processo vivo e não o contrário. Costuma-se dizer que as florestas e as selvas são os “pulmões da Terra”, embora isso tenha sido recentemente questionado, uma vez que vários estudos afirmam que absorvem a mesma quantidade de gás que emitem, pelo que talvez fossem apenas meros trocadores desses gases. No entanto, estes estudos não levam em conta que a absorção de CO_2 não se realiza apenas no crescimento e produção de biomassa vegetal, mas também na produção de energia que possibilita as funções vitais das plantas, energia que passa para a atmosfera ou para o oceano em forma de calor e que contribui para o processo do ciclo hidrológico. Em qualquer caso, no processo de criação destes grandes ecossistemas florestais, ocorre uma fixação abundante de carbono, o que contribui sensivelmente para a redução dos níveis atmosféricos de CO_2 .



Máximo Jurássico

Atualmente, as florestas tropicais ocupam a região equatorial do planeta e entre o Equador e o Polo existe uma diferença térmica de 50°C. Há 65 milhões de anos a temperatura era muito mais elevada do que hoje e a diferença térmica entre o Equador e o Polo era de alguns graus. Todo o planeta tinha clima tropical e era propício para aqueles que formavam o ápice dos ecossistemas daquela época, os **dinossauros**. Os geólogos acreditam que a Terra sofreu um aquecimento global nesta época, durante o **Jurássico Inferior**, com aumentos médios de temperatura atingindo 5°C. Algumas pesquisas indicam que esta foi a causa da erosão acelerada das rochas em até 400%, um processo no qual foram necessários 150 mil anos para que os valores de dióxido de carbono voltassem aos níveis normais.

Máximo térmico do Paleoceno-Eoceno



Mudanças climáticas nos últimos 65 milhões de anos.

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/65_Myr_Climate_Change-es-MTPE.svg)

O gráfico mostra a evolução do clima durante os últimos 65 milhões de anos. O **máximo térmico** do Paleoceno-Eoceno está destacado em vermelho e provavelmente está subestimado por um fator entre 2 e 4 devido à estimativa imprecisa na amostragem de dados.

O **máximo térmico** do Paleoceno-Eoceno (MTPE), também chamado de máximo térmico do Eoceno Inferior, ou máximo térmico do Paleoceno Superior, foi uma mudança climática repentina que marcou o fim do Paleoceno e o início do Eoceno, há 55,8 milhões de

anos. Este é um dos períodos mais significativos de alterações climáticas da era Cenozoica, que alterou a circulação oceânica e atmosférica, provocando a extinção de muitos gêneros de foraminíferos bentônicos, e provocando grandes alterações nos mamíferos terrestres que marcaram o aparecimento das linhagens atuais.

Em apenas 20.000 anos, a temperatura média da Terra **aumentou 6°C**, com um aumento correspondente no nível do mar, bem como um aquecimento dos oceanos. Embora o aquecimento possa ter sido desencadeado por uma multiplicidade de causas, acredita-se que as principais foram a intensa atividade vulcânica e a libertação de metano que foi armazenado nos clatratos dos sedimentos oceânicos, que libertaram para a atmosfera grandes quantidades de carbono empobrecido no isótopo de C^{13} . Além disso, as concentrações atmosféricas de CO_2 aumentaram significativamente, perturbando o seu ciclo e causando a elevação da lisoclina. A diminuição do oxigênio dissolvido na água do mar causou a maioria das extinções marinhas.

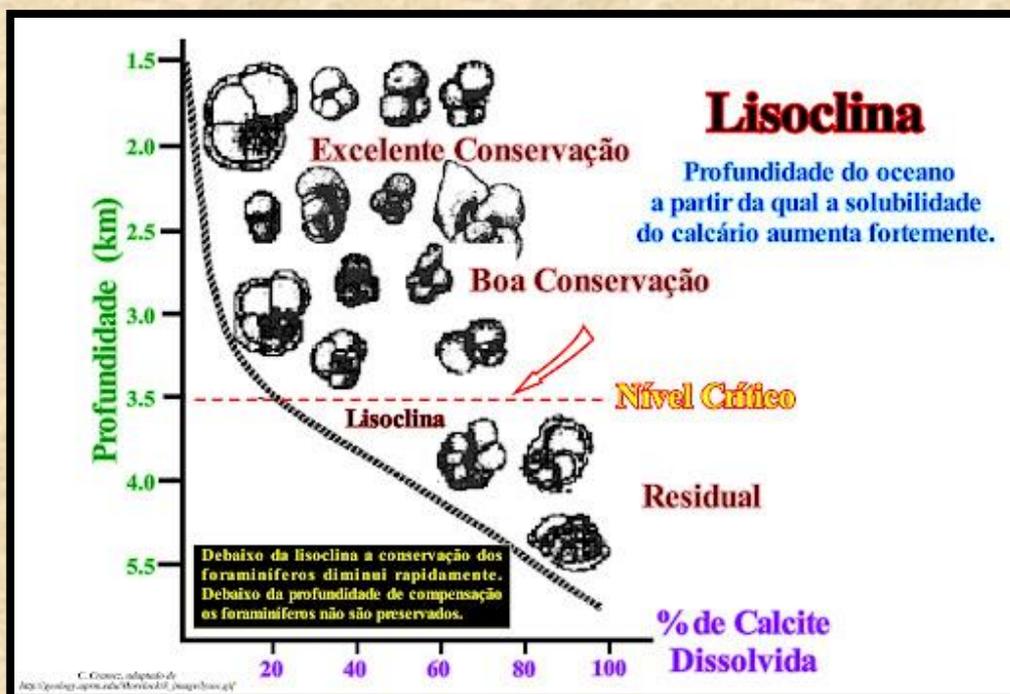


Gráfico da distribuição da solubilidade do carbonato de cálcio no ambiente marinho.

(fonte: <https://lh6.googleusercontent.com/proxy/HrWKyxDgAU2uFxYnooOxRVMP3TJ6ix1GI->

[SAw2z0lwZD7Fd42_6E7u192eAAeAKk2vfeyQ1T_KWHdoJETSZPGzqGkpNLxFIYU16gj3yCTKmp_m0Weo7zUEDo9Q3W7Khwd1ukEzs2A5q7zw](https://lh6.googleusercontent.com/proxy/HrWKyxDgAU2uFxYnooOxRVMP3TJ6ix1GI-SAw2z0lwZD7Fd42_6E7u192eAAeAKk2vfeyQ1T_KWHdoJETSZPGzqGkpNLxFIYU16gj3yCTKmp_m0Weo7zUEDo9Q3W7Khwd1ukEzs2A5q7zw))

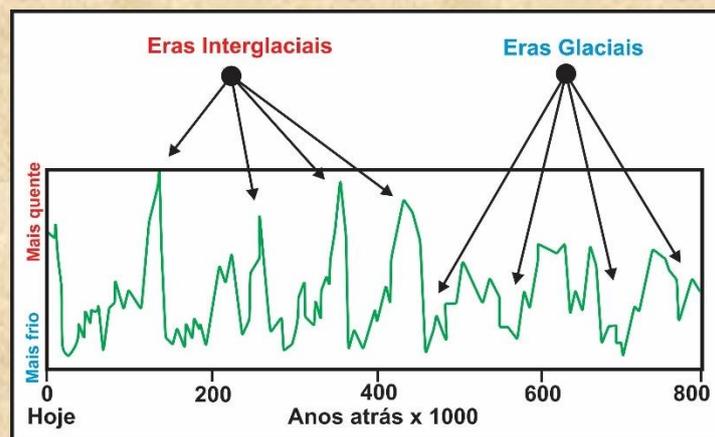
Glaciações do Pleistoceno

O homem moderno provavelmente apareceu há cerca de três milhões de anos. Durante cerca de dois milhões de anos, a Terra sofreu **eras glaciais** nas quais grande parte da América do Norte, Europa e norte da Ásia ficaram cobertas por espessas camadas de gelo durante muitos anos. Depois o gelo desapareceu rapidamente e deu origem ao período **interglacial** em que vivemos. O processo se repete aproximadamente a cada cem mil anos. A última era glacial terminou há cerca de quinze mil anos e deu origem a uma mudança

fundamental nos hábitos do homem, que desenvolveu os conhecimentos necessários para domesticar plantas (agricultura) e animais (pecuária) como o cão e o gado. A melhoria das condições térmicas facilitou a transição do Paleolítico para o Neolítico há cerca de dez mil anos. Nessa altura, o homem já era capaz de construir pequenas aldeias num quadro social bastante complexo.

Somente em 1941 o matemático e astrônomo sérvio Milutin Milanković propôs a teoria de que as variações orbitais da Terra causaram as glaciações do Pleistoceno.

Ele calculou a insolação em altas latitudes no Hemisfério Norte ao longo das estações. Sua tese afirma que **a existência de verões frios, em vez de invernos rigorosos, é necessária para iniciar uma era glacial**. A sua teoria não foi aceite na época; tivemos de esperar até ao início da década de 1950, quando Cesare Emiliani, trabalhando num laboratório da Universidade de Chicago, apresentou a primeira história completa mostrando o avanço e o recuo do gelo durante as últimas eras glaciais. Ele o obteve em um lugar incomum: o fundo do oceano, comparando o conteúdo do isótopo pesado oxigênio-18 (O^{18}) e oxigênio-16 (O^{16}) nas conchas fossilizadas.



Eras glaciais e interglaciais nos últimos 800 mil anos.

(modificado: https://www.clickideia.com.br/sg/conteudos/conteudo/uploads/arquivos/imagem_2_17905_oti.png)

Mínimo de Maunder

O **mínimo de Maunder** é o nome dado ao período de 1645 a 1715, quando as **manchas solares** praticamente desapareceram da superfície do Sol, conforme observado pelos astrónomos da época. Nomeado em homenagem ao astrónomo solar E.W. Maunder, que descobriu a escassez de manchas solares, naquele período, estudando os arquivos daqueles anos. Durante um período de 30 anos dentro do **mínimo de Maunder**, os astrónomos observaram aproximadamente 50 manchas solares, enquanto normalmente seriam observadas 40.000 a 50.000 manchas solares.

Desde que Galileu popularizou o telescópio em 1610, o Sol e as suas manchas têm sido observados regularmente. Somente em 1851 o astrónomo Heinrich Schwabe observou que a atividade solar variava de acordo com um ciclo de onze anos, com máximos e mínimos. O

astrônomo solar Edward Maunder notou que de 1645 a 1715 o Sol interrompeu o ciclo de onze anos e apareceu um período em que quase não apareceram manchas, chamado de "**mínimo de Maunder**". O Sol e as estrelas costumam passar um terço de suas vidas nessas crises e durante elas a energia que emite é menor e corresponde aos períodos frios do clima terrestre. Aurora boreal ou luzes austrais causadas pela atividade solar desaparecem ou são raras.

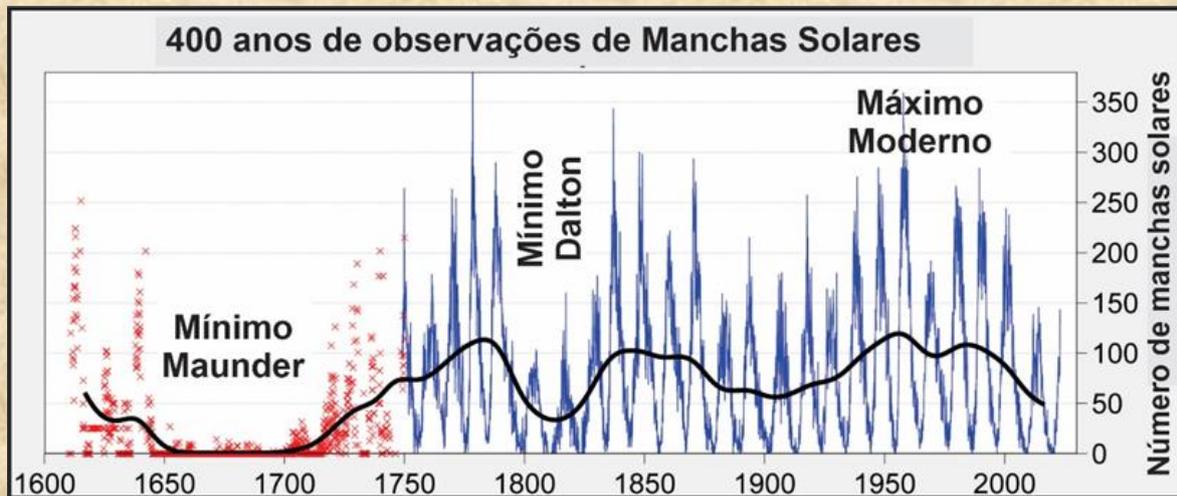


Gráfico de observação de manchas solares nos últimos 400 anos.

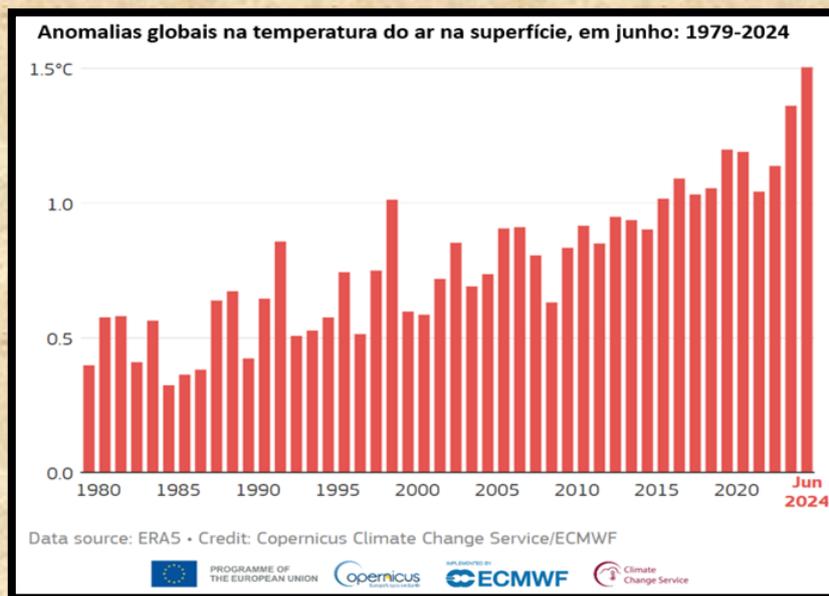
(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Sunspot_Numbers.png)

Houve seis mínimos solares semelhantes aos de **Maunder** desde o **mínimo egípcio** de 1300 AC. até o último, que é do **Maunder**. Mas o seu aparecimento é muito irregular, com períodos de apenas 180 anos, até 1100 anos, entre mínimos. Em média, os períodos de baixa atividade solar duram cerca de 115 anos e repetem-se aproximadamente a cada 600 anos. Estamos atualmente no **Máximo Moderno** que começou em 1780, quando o ciclo de 11 anos reaparece. Um mínimo solar deve ocorrer o mais tardar em 2.900 e um novo período glacial, cujo ciclo é de cerca de cem mil anos, poderá surgir por volta do ano 44.000.

O termo "**mínimo de Maunder**" foi introduzido por John A. Eddy, que publicou um artigo marcante na revista Science em 1976. Alguns astrônomos anteriores a Eddy também nomearam o período em homenagem aos astrônomos solares Annie e E. Walter Maunder (1851-1928), que estudaram a maneira como as latitudes das manchas solares mudam ao longo do tempo.

Mudança climática atual

Aquecimento Global

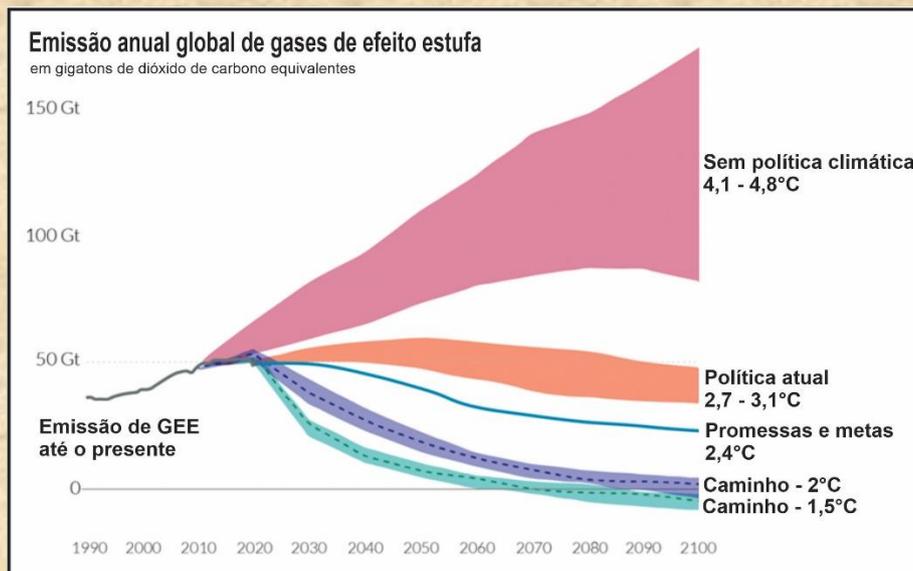


Tendência da mudança térmica nos últimos 50 anos: temperatura média do ar em superfície.

(fonte: <https://projecolabora.com.br/wp-content/uploads/2024/07/eustaquio-183.png>)

Na figura abaixo os possíveis cenários futuros de emissões globais de gases de efeito estufa (GEE).

Se todos os países cumprirem os compromissos atuais estabelecidos no acordo climático de Paris, o aquecimento médio até 2100 irá muito além do objetivo do **Acordo de Paris** de manter o aquecimento “bem abaixo dos 2°C.”



Emissão anual global de gases de efeito estufa (GEE)

(modificado: https://kids.kiddle.co/images/thumb/6/6e/Greenhouse_gas_emission_scenarios_01.svg/410px-Greenhouse_gas_emission_scenarios_01.svg.png)

Na **climatologia**, aquecimento global é o aumento, de longo prazo, da temperatura média atmosférica do sistema climático terrestre, devido à intensificação do efeito estufa. É um aspecto fundamental das atuais alterações climáticas, demonstrado pela medição direta da temperatura, pelo registo de temperatura do último milênio e por vários efeitos do aquecimento global já visíveis.

No passado, houve variações históricas no clima da Terra com provas fornecidas por estudos de paleoclimatologia, mas as que estão atualmente a ocorrer estão a fazê-lo a um ritmo sem precedentes que não pode ser explicado por nenhuma causa natural, pelo que, de acordo com as evidências científicas do aquecimento global, esta mudança drástica só pode ser devida à atividade humana excessiva nos últimos tempos, que é uma das principais causas do aquecimento global.

Os termos, aquecimento global e alterações climáticas, são frequentemente utilizados de forma intercambiável, referindo-se ao aumento geral das temperaturas superficiais e ao seu aumento previsto, causado predominantemente por intensas atividades humanas (antropogênicas). Para alguns especialistas, esta definição corresponde apenas ao aquecimento global, enquanto as alterações climáticas incluem tanto o aquecimento global como os seus efeitos sobre o clima, enquanto para outros é indistinta. Embora tenha havido períodos pré-históricos de aquecimento global, várias das mudanças observadas desde meados do século XX não têm precedentes durante décadas até milénios.

Em 2013, o **Quinto Relatório de Avaliação** (AR5) do Painel Intergovernamental sobre as Alterações Climáticas (IPCC) concluiu que “é extremamente provável que a influência humana tenha sido a causa dominante do aquecimento observado desde meados do século XX.” A maior influência humana tem sido a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, o metano e os óxidos de azoto. As projeções do modelo climático resumidas no AR5 indicaram que durante o século atual a temperatura da superfície global provavelmente aumentará 0,3 a 1,7°C para o seu cenário de emissões mais baixas usando mitigação rigorosa e 2,6 a 4,8°C para o mais alto. Estas conclusões foram apoiadas pelas academias nacionais de ciência dos principais países industrializados e não são contestadas por qualquer organização científica de prestígio nacional ou internacional.

As futuras alterações climáticas e os impactos associados diferirão de região para região em todo o mundo. Os efeitos previstos incluem um aumento das temperaturas globais, um aumento do nível do mar, uma mudança nos padrões de precipitação e uma expansão dos desertos subtropicais.

Prevê-se que o **aquecimento** seja maior em terra do que nos oceanos, com o maior aquecimento a ocorrer no Ártico, com o recuo contínuo dos glaciares, do permafrost e dos bancos de gelo. Outros efeitos prováveis incluem eventos climáticos extremos mais frequentes, como ondas de calor, secas, chuvas torrenciais e fortes nevascas; acidificação dos oceanos e extinção de espécies devido a mudanças nos regimes de temperatura. Os seus impactos humanos significativos incluem a ameaça à segurança alimentar devido à

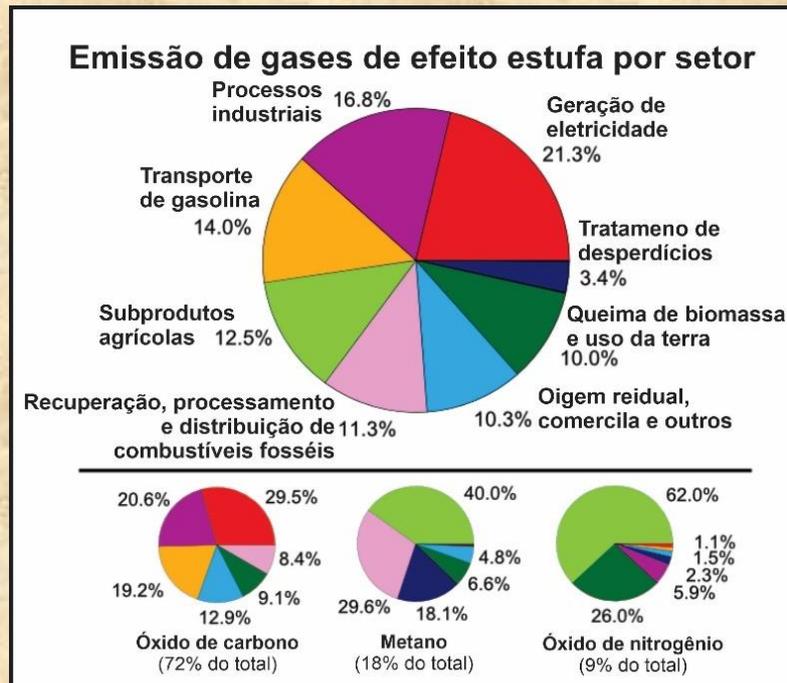
diminuição do rendimento das colheitas e à perda de habitat devido às inundações. Dado que o sistema climático tem uma grande inércia e os gases de efeito estufa permanecerão na atmosfera durante muito tempo, muitos destes efeitos persistirão não apenas durante décadas ou séculos, mas durante dezenas de milhares de anos.

As futuras **alterações climáticas** e os impactos associados serão distintos de região para região em todo o mundo. Os efeitos previstos incluem um aumento das temperaturas globais, um aumento do nível do mar, uma mudança nos padrões de precipitação e uma expansão dos desertos subtropicais. Prevê-se que o aquecimento seja maior em terra do que nos oceanos, com o maior aquecimento a ocorrer no Ártico, com o recuo contínuo dos glaciares, do permafrost e dos bancos de gelo. Outros efeitos prováveis incluem eventos climáticos extremos mais frequentes, como ondas de calor, secas, chuvas torrenciais e fortes nevascas; acidificação dos oceanos e extinção de espécies devido a mudanças nos regimes de temperatura. Os seus impactos humanos significativos incluem a ameaça à segurança alimentar devido à diminuição do rendimento das colheitas e à perda de habitat devido às inundações. Dado que o sistema climático tem uma grande inércia e os gases de efeito estufa permanecerão na atmosfera durante muito tempo, muitos destes efeitos persistirão não apenas durante décadas ou séculos, mas durante dezenas de milhares de anos.

As possíveis respostas ao aquecimento global incluem a mitigação através da redução das emissões, da adaptação aos seus efeitos, da construção de sistemas resilientes aos seus impactos e à possível engenharia climática futura. A maioria dos países são partes na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas (CQNUAC), cujo objetivo final é prevenir alterações climáticas antropogênicas perigosas. A CQNUAC adoptou uma série de políticas destinadas a reduzir as emissões de gases de efeito estufa⁴ e a ajudar na adaptação ao aquecimento global. Os membros da CQNUAC concordaram que são necessárias grandes reduções nas emissões e que o futuro aquecimento global deve ser limitado a bem abaixo de 2,0°C em relação ao nível pré-industrial, com esforços para limitá-lo a 1,5°C.

A reação pública ao aquecimento global e a preocupação com os seus impactos também estão a aumentar. Um relatório global de 2015 do *Pew Research Center* descobriu que em média, 54% consideram-no “um problema muito sério”. Existem diferenças regionais significativas, estando os americanos e os chineses, cujas economias são responsáveis pelas maiores emissões anuais de CO₂, entre os menos preocupados.

Agricultura



Emissão de gases de efeito estufa por setor

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Greenhouse_Gas_by_Sector-es.png)

As **alterações climáticas** e a **agricultura** são dois processos inter-relacionados que prejudicam e destroem o mundo.

As **alterações climáticas** afetam a **agricultura** de diferentes maneiras; os impactos estão relacionados com o aumento da temperatura média, a modificação do padrão de precipitação, o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos (secas, inundações, tornados, ciclones, ondas de calor), o aumento da concentração de dióxido de carbono, o derretimento da neve e a interação entre estes elementos, que influenciam a produção de alimentos e ameaçam a segurança alimentar.

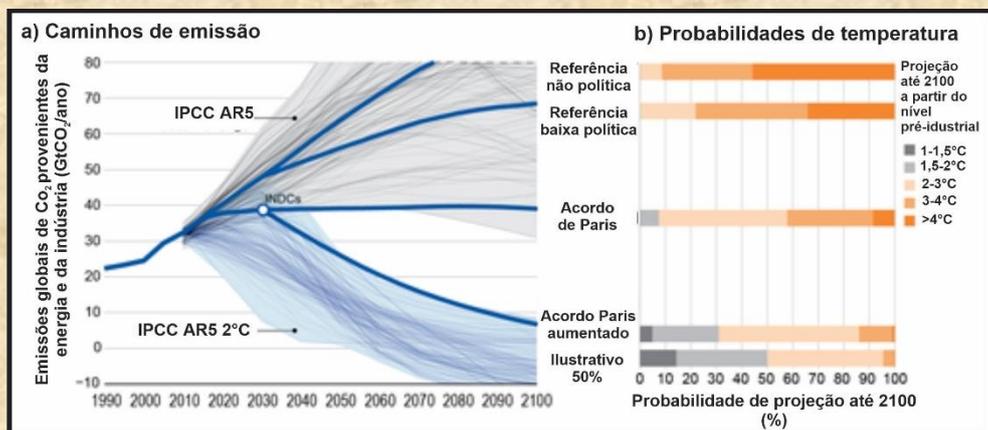
Ao mesmo tempo, as **atividades agrícolas** têm contribuído para as alterações climáticas através das emissões de gases de efeito estufa, principalmente dióxido de carbono, metano e óxido nítrico. O excesso destes gases, na atmosfera, tem perturbado a capacidade da Terra de regular a temperatura, e é responsável por induzir o aquecimento global e forçar as alterações climáticas.

As **alterações climáticas** já estão a afetar a **agricultura**, prevendo-se que os impactos se agravem nos próximos anos com diferentes graus de severidade e complexidade, podendo variar de acordo com a região geográfica e as condições particulares do contexto climático e socioeconômico dos sistemas de produção alimentar.

Períodos prolongados de seca, ondas de calor, redução da disponibilidade de água e excesso de chuvas reduzem o rendimento das colheitas e afetam a saúde e o bem-estar do gado e, portanto, a disponibilidade de alimentos. As **alterações climáticas** são uma ameaça à segurança alimentar; em particular, as populações mais vulneráveis serão as mais atingidas.

Por outro lado, uma boa gestão do conhecimento gerado pela ciência das **alterações climáticas** poderia impulsionar a aplicação de estratégias favoráveis de mitigação e adaptação para reduzir as emissões, maximizar a produção e favorecer o desenvolvimento de sistemas de produção melhor adaptados às alterações climáticas.

Efeitos



Emissões globais de CO₂ e resultados probabilísticos de temperatura com diferentes políticas.

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/44/Global_CO2_emissions_and_probabilistic_temperature_outcomes_of_Paris.png/500px-Global_CO2_emissions_and_probabilistic_temperature_outcomes_of_Paris.png)

Não foram atribuídas probabilidades a estas projeções, pelo que nenhuma destas projeções deve ser interpretada como uma “melhor estimativa” da futura subida do nível do mar.

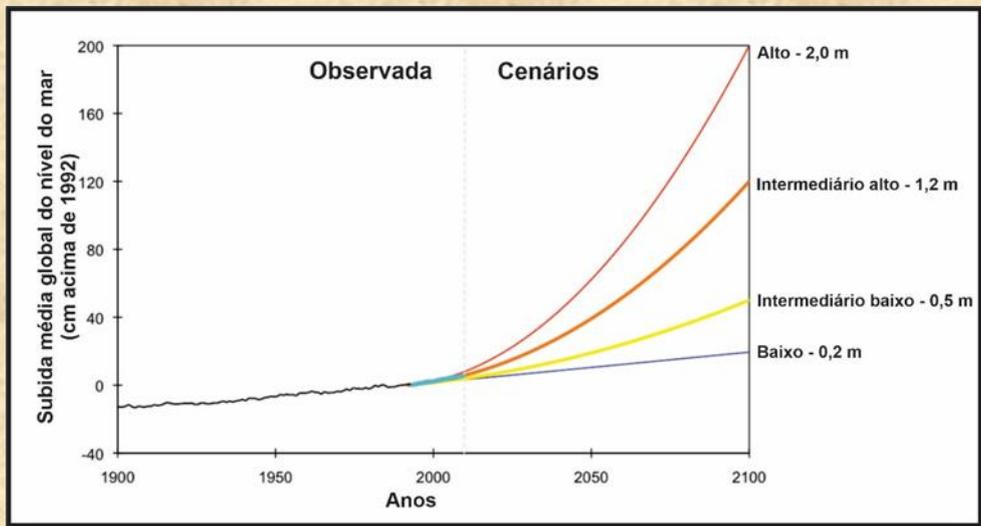
Os efeitos do aquecimento global incluem efeitos ambientais, sociais, econômicos e de saúde. Algumas já são observadas e outras são esperadas no curto, médio ou longo prazo (com graus variados de certeza); alguns são localizados e outros globais; alguns são graduais e outros abruptos; alguns são reversíveis e outros não; alguns podem ter consequências positivas, mas a maioria são adversas.

Os efeitos **ambientais** incluem o aumento da temperatura dos oceanos, a acidificação dos oceanos, o recuo dos glaciares, o derretimento do gelo do Ártico, a subida do nível do mar, um possível encerramento da circulação oceânica, extinções em massa, desertificação, fenômenos meteorológicos extremos, alterações climáticas abruptas e efeitos a longo prazo.

Os efeitos **econômicos e sociais** incluem alterações na produtividade agrícola, propagação de doenças, uma possível abertura da Passagem do Noroeste, inundações, impactos sobre os povos indígenas, migrações ambientais e guerras climáticas.

Os efeitos **futuros** das alterações climáticas irão variar dependendo das políticas de alterações climáticas e do desenvolvimento social. As duas principais políticas para enfrentar as alterações climáticas são a redução das emissões de gases de efeito estufa (mitigação) e a adaptação aos seus efeitos. A engenharia climática é outra opção. As políticas de curto prazo podem afetar significativamente os efeitos a longo prazo. Políticas de mitigação rigorosas

podem limitar o aquecimento global até 2100 a cerca de 2°C ou menos, em relação aos níveis pré-industriais. Sem mitigação, um aumento na procura de energia e a utilização generalizada de combustíveis fósseis poderiam levar a um aquecimento global de cerca de 4 °C. Magnitudes mais elevadas tornariam mais difícil a adaptação e aumentariam o risco de impactos negativos.



Projeções do aumento médio global do nível do mar.

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fc/Projections_of_global_mean_sea_level_rise_by_Parris_et_al._%282012%29-es.png/1100px-Projections_of_global_mean_sea_level_rise_by_Parris_et_al._%282012%29-es.png)

Opiniões científicas

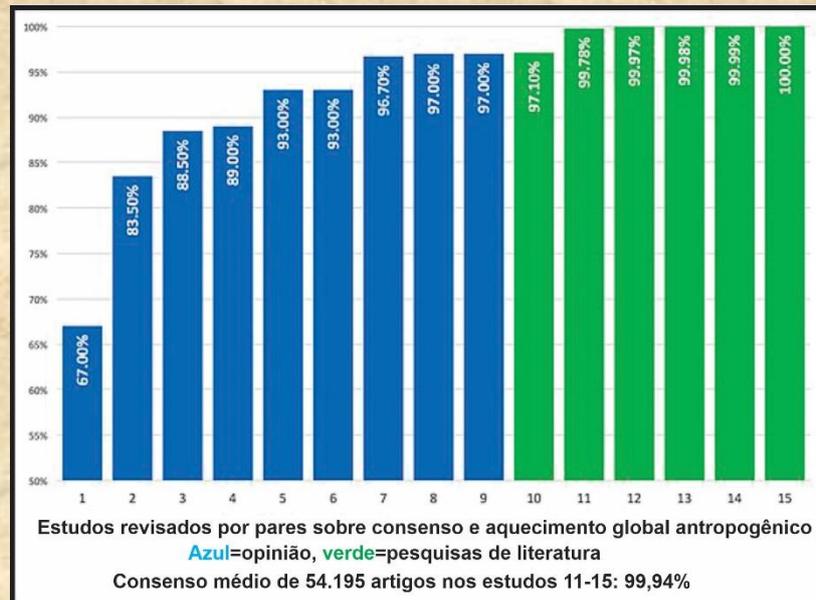


Sete artigos sobre o consenso do aquecimento global de origem antropogênica desde 2004-2015 por Oreskes, N.; Doran, P.; Anderegg, W.; Verheggen, B.; Stenhouse, N.; Carlton, J.S. & Cook, J.

(modificado: https://www.wikiwand.com/es/articles/Cambio_clim%C3%A1tico)

A opinião científica sobre a mudança climática é o consenso global entre cientícos a respeito da extensão em que está ocorrendo o aquecimento global, suas causas e suas consequências prováveis. O consenso científico é que o **sistema climático** da Terra está inequivocamente em calor e que é sumamente provável (é dito, com uma probabilidade maior de 95%) que este calor seja predominantemente causado pelos seres humanos. É provável que isso surja principalmente no aumento das concentrações de gases de efeito

invernal na atmosfera produto da queima de combustíveis fósseis e nas mudanças nos usos do solo, parcialmente compensado pelo aumento dos aerossóis causado pelo homem; as mudanças naturais tiveram pouco efeito.



Estudos revisados por pares sobre o consenso do aquecimento global

(modificado: www.jamespowell.org)

Esta **opinião científica** é expressa em relatórios de síntese, de prestigiados organismos científicos nacionais e internacionais e em inquéritos de opinião entre cientistas do clima. Cientistas, universidades e laboratórios individuais contribuem para a **opinião científica** global através das suas publicações revistas por pares, e as áreas de acordo coletivo e de relativa certeza são resumidas em relatórios e inquéritos. Desde 2004, ocorreram pelo menos 9 pesquisas de cientistas e metaestudos de artigos acadêmicos sobre o aquecimento global. Embora até 18% dos cientistas inquiridos possam discordar da visão consensual, quando restrito a cientistas que publicam na área climática, 97% a 100% concordam com o consenso: o aquecimento atual é principalmente antropogênico (causado pelo homem). Em 2021, foram publicadas novas pesquisas sobre 88.125 estudos científicos revisados por pares relacionados ao clima, dos quais 99,9% dos artigos concordam que as mudanças climáticas são causadas principalmente pelos seres humanos.

Academias e sociedades científicas nacionais e internacionais avaliaram a opinião científica atual sobre o aquecimento global. Estas avaliações são globalmente compatíveis com as conclusões do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. O **Quarto**

Relatório de Avaliação do IPCC afirma que:

- O aquecimento do sistema climático é inequívoco, como evidenciado pelo aumento das temperaturas médias globais do ar e dos oceanos, pelo derretimento generalizado da neve e do gelo, que tem como consequências o aumento médio global do nível do mar.

- A maior parte do aquecimento global desde meados do século XX provavelmente se deve às atividades humanas.
- Os benefícios e custos das alterações climáticas para a sociedade variarão amplamente, dependendo da localização e da escala. Alguns dos efeitos nas regiões temperadas e polares serão positivos e outros serão negativos. Em geral, é mais provável que os efeitos líquidos sejam fortemente negativos com um aquecimento maior ou mais rápido.
- A série de evidências publicadas indica que os custos líquidos dos danos causados pelas alterações climáticas serão provavelmente significativos e aumentarão ao longo do tempo.
- A resiliência de muitos ecossistemas será provavelmente esmagada neste século por uma combinação sem precedentes de alterações climáticas, perturbações associadas (por exemplo, inundações, secas, incêndios florestais, insetos e acidificação dos oceanos) e outras forças da mudança global (por exemplo, alterações no uso da terra, poluição, fragmentação de sistemas naturais, sobre-exploração de recursos).

Em 2018, o IPCC publicou um **Relatório Especial sobre o Aquecimento Global de 1,5°C**, que alertava que se a atual taxa de emissões de gases de efeito estufa não for mitigada, o aquecimento global provavelmente atingirá 1,5°C (2,7°F) entre 2030 e 2052, arriscando-se a crises graves. O relatório afirma que a prevenção de tais crises exigirá uma rápida transformação da economia global que “não tem precedente histórico documentado”. Em 2022, um novo relatório do IPCC intitulado Alterações Climáticas 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade enfatiza “a tomada de medidas urgentes para enfrentar os riscos crescentes”, argumentando que enfrentaremos um aquecimento de 1,5°C nas próximas duas décadas, o que levará a “impactos graves adicionais, alguns dos quais serão irreversíveis”.

As academias nacionais de ciência apelaram aos líderes mundiais para que criassem políticas que reduzissem as emissões globais. Alguns organismos científicos recomendaram políticas específicas aos governos e a ciência pode desempenhar um papel na informação de uma resposta eficaz às alterações climáticas. As decisões políticas, no entanto, podem exigir julgamentos de valor, pelo que não são incluídas na opinião científica.

Nenhum organismo científico nacional ou internacional de prestígio detém uma opinião formal que discorde de qualquer um destes pontos principais. O último órgão científico nacional ou internacional a retratar a sua dissidência foi a Associação Americana de Geólogos de Petróleo, que em 2007 atualizou a sua declaração para a sua atual posição indefinida. Algumas outras organizações, principalmente as voltadas para a geologia, também ocupam posições indefinidas.

Ativismo

Existem inúmeras **manifestações públicas** em todo o mundo em relação às alterações climáticas e, grande parte dos movimentos ambientalistas consideram este problema como o principal e o mais grave dos problemas ambientais, sendo um dos principais pontos de investigação e mobilização dos cidadãos. Em 2023, uma em cada duas pessoas vivia em áreas altamente vulneráveis às alterações climáticas.

Desde o verão de 2018, o movimento *Fridays for Future*, liderado pela jovem Greta Thunberg, que iniciou os seus protestos manifestando-se diariamente em frente ao parlamento sueco por ação política, tem-se espalhado globalmente.

O movimento promoveu greves e mobilizações estudantis a nível internacional, incluindo a greve climática, que foi realizada em 15 de março de 2019 e foi seguida em 58 cidades espanholas, a segunda greve climática global, que foi realizada em 24 de maio de 2019, e a Semana Global do Clima, que foi realizada entre 20 e 27 de setembro de 2019.

Soluções para mitigar as mudanças climáticas

As **alterações climáticas** e a perda de **biodiversidade** tornaram-se uma das questões mais importantes para a opinião pública, como evidenciado pelo inquérito *The World 2030* realizado pela UNESCO em 2020, segundo o qual 67% dos inquiridos na América do Norte, Europa Ocidental, Europa de Leste, América Latina, Ásia, Estados Árabes e África Subsaariana afirmaram que estes são os maiores desafios da atualidade.

Perante esta crescente preocupação da opinião pública global, governos, empresas e as organizações não governamentais fizeram progressos na implementação de soluções para mitigar as **alterações climáticas**. Uma destas soluções inovadoras foi promovida pelo governo norueguês no projeto de captura e armazenamento de carbono (CSS) em grande escala e envolve o bombeamento de milhões de toneladas de CO₂ sob o Mar do Norte. Esta solução será implementada na Noruega através do projeto *Northern Lights* executado pelas empresas petrolíferas Equinor, Total e Shell.

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), em 2024 a *Northern Lights* será a primeira rede de infraestruturas de transporte e armazenamento de CO₂. Oferecerá às empresas de toda a Europa a oportunidade de armazenar o seu CO₂ de forma segura e permanente nas profundezas do fundo do mar norueguês. A empresa está a construir dois transportadores de CO₂ dedicados e enviará o CO₂ capturado para um terminal terrestre ao largo da costa oeste da Noruega e, a partir daí, transportá-lo-á por gasoduto para um local de armazenamento subterrâneo *offshore* no Mar do Norte. A primeira fase do projeto será concluída em meados de 2024, com capacidade de até 1,5 milhão de toneladas de CO₂ por ano. A ambição é expandir a capacidade em mais 3,5 milhões de toneladas, para um total de

5 milhões de toneladas, dependendo da procura do mercado. Ambas as fases oferecerão flexibilidade para receber CO₂ de fontes europeias.

Ação para o empoderamento climático

A **Action for Climate Empowerment** (ACE) é uma iniciativa promovida pela **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas** (CQNUAC) que procura integrar a educação e a sensibilização pública na luta contra as alterações climáticas. Tanto o artigo 6.º da CQNUAC como o artigo 12.º do **Acordo de Paris** (ADP) reconhecem a ACE como um passo decisivo para reforçar a resiliência dos países às alterações climáticas. A sua abordagem transversal envolve todos os níveis da sociedade na criação e apoio às ações climáticas necessárias para cumprir os compromissos assumidos nas **Contribuições Nacionalmente Determinadas** (CND).

O principal objetivo da ACE é promover o surgimento de uma cidadania consciente, ativa e corresponsável, capaz de contribuir para transições ecológicas e sociais urgentes. Para conseguir isso, o ACE baseia-se em seis áreas principais: educação, sensibilização, formação, participação pública, acesso à informação e cooperação. Estas áreas procuram dotar a população de conhecimentos e competências necessárias para enfrentar eficazmente as alterações climáticas.

Globalmente, a inclusão da **educação** nas estratégias climáticas nacionais tem sido limitada. Apenas 24% das Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND) mencionam o papel da educação na agenda climática, enquanto apenas 21% mencionam especificamente a educação sobre as alterações climáticas. Na América Latina e nas Caraíbas, menos de 10% dos ADP dão prioridade ao setor da educação como parte das suas estratégias de adaptação às alterações climáticas. Esta falta de integração reflete uma das principais barreiras à implementação eficaz do ACE, uma vez que não foi atribuído o financiamento necessário para levar a cabo estas estratégias a nível nacional.

Nos últimos anos, a **educação** e as **alterações climáticas** ganharam mais destaque na agenda climática global, especialmente nas **Conferências Anuais das Partes sobre Alterações Climáticas** (COP). Iniciativas como a Aliança para a Educação Ecológica, coordenada pela UNESCO, procuram garantir que os alunos adquiram os conhecimentos, valores e competências necessários para enfrentar os desafios climáticos e promover o desenvolvimento sustentável.

Políticas climáticas

As **políticas climáticas** são fundamentais no combate às alterações climáticas, uma vez que procuram tanto a mitigação das emissões de gases de efeito estufa como a adaptação

aos seus efeitos. Estas políticas incluem uma vasta gama de medidas, desde a implementação de impostos sobre o carbono e regulamentação dos combustíveis fósseis até incentivos de mercado que promovam a inovação e a mudança comportamental em sectores-chave. No entanto, o impacto destas políticas não se limita apenas ao domínio ambiental, mas também tem importantes repercussões econômicas e sociais.

A concepção e implementação de **políticas climáticas** têm sido objeto de debate, particularmente devido ao seu impacto nos setores de baixos rendimentos e no desenvolvimento econômico dos países. As medidas fiscais, como os impostos sobre o carbono, podem por vezes ter um efeito regressivo, afetando desproporcionalmente os mais vulneráveis. Portanto, é crucial que as **políticas climáticas** considerem compensações que mitiguem estes efeitos negativos e promovam uma transição justa, que garanta que a luta contra as alterações climáticas não abandone as comunidades mais desfavorecidas.

Historicamente, as **políticas climáticas** começaram a desenvolver-se nos países industrializados na década de 1950, com foco inicial na regulamentação ambiental. Na América Latina e nas Caraíbas, durante as décadas de 1980 e 1990, foram criados Ministérios do Meio-Ambiente, embora a implementação de políticas ambientais gerasse frequentemente tensões com interesses econômicos privados e fosse vista como um obstáculo ao crescimento econômico. Apesar destes desafios, hoje é reconhecida a importância da integração das **políticas climáticas** nos planos de desenvolvimento sustentável da região.

Na Europa, países como França e Espanha lideraram o caminho para a transição ecológica, transformando os seus Ministérios do Ambiente em Ministérios de Transição Ecológica, com foco na descarbonização da economia. Apesar dos compromissos assumidos no Acordo de Paris através de Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), relatórios como o *Climate Action Tracker* (CAT) indicam que os esforços atuais não são suficientes para limitar o aquecimento global. Isto realça a necessidade de uma maior coordenação entre os principais ministérios, como as Finanças, o Planeamento e o Meio-Ambiente, para desenvolver estratégias de investimento alinhadas com os objetivos climáticos.

Outro aspecto crucial das **políticas climáticas** é o conceito de transição justa, que visa garantir que as ações para reduzir as emissões não afetem de forma desigual as comunidades mais vulneráveis. Esta abordagem, que integra princípios de justiça social e equidade, é essencial para que as políticas climáticas sejam não só eficazes, mas também socialmente viáveis. Neste sentido, um número crescente de países está a adoptar quadros de transição justa, que estabelecem princípios e mandatos sociais para orientar a ação climática.

O papel dos jovens na **política climática** é cada vez mais importante. Na América Latina e nas Caraíbas, os jovens têm demonstrado um elevado compromisso com a proteção ambiental, participando ativamente em atividades para reduzir o consumo de energia e promover produtos sustentáveis. No entanto, muitos deles sentem que têm pouca influência

na formulação de políticas públicas sobre as alterações climáticas, embora as suas ações sejam decisivas para as gerações futuras.

Para garantir uma descarbonização eficaz e justa, as políticas climáticas devem abordar várias frentes simultaneamente:

1. Planejar um futuro com emissões líquidas zero, estabelecendo objetivos claros de redução de emissões.
2. Corrigir os preços, eliminando os subsídios aos combustíveis fósseis e aplicando impostos sobre o carbono.
3. Facilitar as transições setoriais, promovendo a inovação em sectores-chave como a energia, os transportes e a agricultura.
4. Garantir o fluxo de financiamento para investimentos sustentáveis que apoiem a transição energética.
5. Garantir uma transição justa, integrando a justiça social e a equidade na tomada de decisões climáticas.

As **políticas climáticas** são, portanto, essenciais para alcançar uma transição para um futuro sustentável e de baixo carbono. Estas políticas não devem centrar-se apenas na mitigação das emissões, mas também em garantir que os seus efeitos económicos e sociais sejam equitativos e justos. Somente através de uma abordagem abrangente que combine a ação climática com a equidade social é que o desafio das alterações climáticas poderá ser enfrentado de forma eficaz e sustentável.

Planos Nacionais de Adaptação

Os **Planos Nacionais de Adaptação** (PNA) são ferramentas de planeamento que permitem aos países identificarem os riscos associados às alterações climáticas e priorizar as medidas necessárias para os enfrentar. Estes instrumentos são essenciais para integrar estratégias de resiliência de longo prazo nos planos nacionais de desenvolvimento e recuperação económica, garantindo uma resposta mais eficaz aos impactos climáticos.

O desenvolvimento de **PNA** enquadra-se nas disposições do Acordo de Paris, que destaca a importância de acelerar as respostas nacionais aos riscos crescentes. De acordo com o Relatório sobre a Lacuna de Adaptação (2022) do Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUMA), embora tenham sido feitos progressos significativos no planeamento e implementação da adaptação, este progresso não está ao nível exigido pelo aumento dos riscos climáticos. As barreiras à implementação eficaz incluem limitações de capacidade técnica, financeira e institucional, que o que destaca a necessidade de reforçar o apoio internacional e nacional a estes processos.

Os **PNA** não procuram apenas mitigar os riscos atuais, mas também promover uma adaptação que integre a sustentabilidade no desenvolvimento a longo prazo. Estes planos devem ser concebidos de forma abrangente, abrangendo todos os sectores económicos e

sociais e considerando tanto as necessidades locais como as prioridades nacionais. As principais medidas incluem a redução da vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como inundações e secas, e a incorporação de infraestruturas resilientes aos impactos das alterações climáticas.

Além disso, os **PNA** são uma evolução dos **Planos de Ação Nacionais de Adaptação** (PANA), que foram inicialmente concebidos para responder às necessidades urgentes dos países menos desenvolvidos. Os **PNA**, por outro lado, proporcionam um quadro estratégico que permite aos países integrarem sistematicamente a adaptação às alterações climáticas nas suas estratégias de desenvolvimento nacionais e regionais. Esta abordagem procura não só reduzir os riscos a curto prazo, mas também garantir uma resiliência sustentável através de mecanismos de monitorização, avaliação e ajustamento periódico.

A implementação dos **PNA** representa também uma oportunidade para promover a cooperação internacional e local, garantindo que os territórios e comunidades vulneráveis participem ativamente no planeamento e aplicação de medidas adaptativas. Desta forma, os **PNA** contribuem para a construção de sociedades mais resilientes face aos desafios crescentes das alterações climáticas.

Clima de planetas vizinhos

Como já foi dito, o dióxido de carbono desempenha um papel regulador fundamental no nosso planeta. No entanto, o CO₂ não pode acomodar qualquer desvio e pode, por vezes, até promover um efeito estufa descontrolado através de um processo de *feedback*.

- **Vênus** tem uma atmosfera cuja pressão é 94 vezes superior à da Terra e é composta por 97% de CO₂. A falta de água impediu a extração do dióxido de carbono da atmosfera; ele se acumulou e causou um intenso efeito estufa que aumentou a temperatura da superfície para 465°C, capaz de derreter o chumbo. Provavelmente a menor distância ao Sol tenha sido decisiva para condenar o planeta às condições infernais que vivencia atualmente. Devemos lembrar que pequenas mudanças podem desencadear um mecanismo de feedback e se este for suficientemente poderoso pode sair do controle, dominando todos os outros fatores até dar condições extremas como as de Vênus, um aviso sobre o possível futuro que pode estar reservado para a Terra.

- **Marte** tem uma atmosfera com pressão de apenas seis hectopascals e embora seja composta por 96% de CO₂, o efeito estufa é escasso e não consegue evitar nem uma oscilação diurna da ordem dos 55°C na temperatura, nem as baixas temperaturas da superfície que atingem mínimos de -86°C em latitudes médias. Mas parece que no passado gozou de melhores condições, com a água a correr pela sua superfície, como demonstra a multiplicidade de canais e vales de erosão. Mas isso se deveu a uma maior concentração de dióxido de carbono na sua atmosfera. O gás viria das emanações dos grandes vulcões marcianos que provocariam um processo de desgaseificação semelhante ao ocorrido em

nosso planeta. A diferença substancial é que o diâmetro de Marte é metade do diâmetro da Terra. Isso significa que o calor interno era bem menor e ele esfriou há muito tempo. Sem atividade vulcânica, **Marte** estava condenado e o CO₂ escapou facilmente da atmosfera, visto que também tem menos gravidade que a da Terra, o que facilita o processo. Também é possível que algum processo do tipo mineral tenha absorvido CO₂ e, por não ter sido compensado por emissões vulcânicas, tenha causado sua diminuição drástica. Como consequência, o planeta arrefeceu progressivamente até congelar o pouco CO₂ nas atuais calotas polares.

Matéria multidisciplinar

O estudo das alterações climáticas tem-se caracterizado por uma abordagem predominante às Ciências Naturais: Meteorologia, Física, Química, Astronomia, Geografia, Geologia e Biologia. Mas dado que as alterações climáticas são uma redistribuição que altera o ambiente natural e social, o seu estudo tornou-se nos últimos anos um campo multidisciplinar.

As consequências de compreendermos ou não plenamente as questões relacionadas com as **alterações climáticas** têm influências profundas na subsistência da sociedade humana e devem ser abordadas a partir de diferentes pontos de vista, tais como económico, político, histórico, sociológico, antropológico, entre outros. Dessa forma, o estudo de diversas disciplinas tende a gerar estratégias plurais de mitigação e adaptação a esse fenómeno ambiental.

Educação sobre as Mudanças Climáticas



Diagrama da UNESCO que visualiza uma "abordagem de toda a escola"

para enfrentar as mudanças climáticas.

(modificado: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d0/Figure_1_Whole_school_approach_to_climate_change_Getting_Climate-Ready-es.svg/800px-Figure_1_Whole_school_approach_to_climate_change_Getting_Climate-Ready-es.svg.png)

A **educação sobre mudanças climáticas** (ESMC) é uma disciplina educacional focada no desenvolvimento de respostas eficazes às mudanças climáticas. O seu objetivo é que os alunos compreendam as causas e consequências deste fenômeno, preparando-os para enfrentar os seus impactos e capacitando-os para a adoção de estilos de vida mais sustentáveis. Além de promover a literacia climática, a **ESMC** promove uma mudança de mentalidade no sentido da mitigação das alterações climáticas.

As alterações climáticas e a educação sobre este tema são desafios globais que podem ser integrados nos currículos escolares, oferecendo uma aprendizagem contextualizada que promove uma compreensão profunda das várias estratégias para enfrentar este fenómeno.

A **ESMC** é também um recurso essencial para os decisores políticos, ajudando-os a compreender a urgência da implementação de medidas relativas às alterações climáticas, tanto a nível nacional como global. As comunidades, por sua vez, beneficiam da **ESMC** ao aprenderem como as alterações climáticas as podem afetar, que ações podem tomar para se protegerem e como reduzir a sua pegada de carbono. Em particular, a **ESMC** fortalece a resiliência das comunidades vulneráveis, que são mais afetadas pelos efeitos adversos das alterações climáticas. Esta abordagem educacional baseia-se nos princípios da **Educação para o Desenvolvimento Sustentável** (EDS).

Referências

- Adger, *et al.*, (2007). Chapter 17: Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity, em IPCC AR4 WG2.
- AGENCIAS, RTVE es / (2019). 'Fridays for future' Miles de estudiantes se echan a la calle en todo el mundo para secundar la huelga por el clima. *RTVE.es*.
- AMS Council (2012). «2012 American Meteorological Society (AMS) Information Statement on Climate Change». *AMS* (Boston, Massachusetts, EE. UU.).
- Anderegg, W.R.L.; Prall, J.W.; Harold, J. & Schneider, S.H. (2010). «Expert credibility in climate change». *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 107 (27): 12107-9. Bibcode:2010PNAS. 10712107A. PMC 2901439. PMID 20566872. doi:10.1073/pnas.1003187107.
- Arakawa, A. & W. H. Schubert, 1974: «Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large scale environment (part I)», en *J. Atmos. Sci.*, 31: 674-701.
- Archer, D. & Ganopolski, A. (2005). «A movable trigger: Fossil fuel CO₂ and the onset of the next glaciation». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems.* 6(5). ISSN 1525-2027. doi:10.1029/2004GC000891.
- Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: the troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter». *Journal of*

- Atmospheric and Terrestrial Physics* 50(3): 197-206. 1988. ISSN 0021-9169. doi:10.1016/0021-9169(88)90068-2.
- Barclay, E. (2019). «How big was the global climate strike? 4 million people, activists estimate.». *Vox*.
- Battisti, D. & Naylor, R.L. (2009). «Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat». *Science* 323 (5911): 240-244. PMID 19131626. doi:10.1126/science.1164363.
- Benestad, R.E. (2013). «Are there persistent physical atmospheric responses to galactic cosmic rays?». *Environmental Research Letters* 8 (3): 035049. ISSN 1748-9326. doi:10.1088/1748-9326/8/3/035049.
- Berger, A. & Loutre, M. F. (2000). «Future Climatic Changes: Are We Entering an Exceptionally Long Interglacial?». *Climatic Change* 46 (1-2): 61-90. ISSN 1573-1480. doi:10.1023/A:1005559827189.
- Blatter, H.; Takahashi, K.; Okuno, J.; Raymo, M.E.; Kawamura, K.; Saito, F. & Abe-Ouchi, A. (2013). «Insolation-driven 100 000-year glacial cycles and hysteresis of ice-sheet volume». *Nature* (en inglés) 500 (7461): 190-193. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/nature12374.
- Bobrowsky, P.T., ed. (2007). *Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach*. Springer-Verlag. ISBN 9783540327097.
- Bos, M.S. & Schwartz, L. (2023). «Educación y cambio climático: ¿cómo desarrollar habilidades para la acción climática en la edad escolar?». *IDB Publications*. doi:10.18235/0004917.
- Brewer, S.; Shafer, S.L.; Bartlein, P.J.; Shuman, B.N. & Marsicek, J. (2018). «Reconciling divergent trends and millennial variations in Holocene temperatures». *Nature*. 554 (7690): 92-96. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/nature25464.
- Brovkin, V.; Calov, R.; Ganopolski, A. & Willeit, M. (2019). «Mid-Pleistocene transition in glacial cycles explained by declining CO₂ and regolith removal». *Science Advances* 5 (4): eaav7337. ISSN 2375-2548. doi:10.1126/sciadv.aav7337.
- Brugger, J.; Feulner, G. & Petri, S. (2017). «Baby, it's cold outside: Climate model simulations of the effects of the asteroid impact at the end of the Cretaceous». *Geophysical Research Letters* (en inglés) 44 (1): 419-427. ISSN 1944-8007. doi:10.1002/2016GL072241.
- Canfield, D.E.; Bian, L.; Zhang, B.; Connelly, J.N.; Bjerrum, C.J.; Costa, M.M.; Wang, H. & Hammarlund, E.U. *et al.* (2015). «Orbital forcing of climate 1.4 billion years ago». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (12): E1406-E1413. ISSN 1091-6490. PMID 25775605. doi:10.1073/pnas.1502239112.
- Cárdenas, M.; Bonilla, J.P. & Brusa, F. (2021). «Políticas climáticas en América Latina y el Caribe: casos exitosos y desafíos en la lucha contra el cambio climático». *IDB Publications*. doi:10.18235/0003239.

- Carlton, J.S.; Perry-Hill, R.; Huber, M. & Prokopy, L.S. (2015). «The climate change consensus extends beyond climate scientists». *Environmental Research Letters* 10 (9): 094025. ISSN 1748-9326. doi:10.1088/1748-9326/10/9/094025.
- Charlson, R. J.; Schwartz, S. E.; Hales, J. M.; y otros (1992), «Climate forcing by anthropogenic aerosols», *Science* 255 (5043): 423-430, ISSN 1095-9203, PMID 17842894, doi:10.1126/science.255.5043.423.
- Científicas, SINC Servicio de Información y Noticias (2018). «Primer análisis completo de la actividad solar de los últimos 400 años». www.agenciasinc.es.
- Clarke, L., *et al.* (2014). Section 6.3.1.3 Baseline emissions projections from fossil fuels and industry (pp.17-18 of final draft), in: Chapter 6: Assessing Transformation Pathways in: IPCC AR5 WG3.
- Cook, J.; Nuccitelli, D.; Green, S.A.; Richardson, M.; Winkler, B.; Painting, R.; Way, R. & Skuce, A. (2013). «Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature». *Environmental Research Letters* (2): 024024. Bibcode:2013ERL.....8b4024C. ISSN 1748-9326. doi:10.1088/1748-9326/8/2/024024.
- Cook, J.; Oreskes, N.; Doran, P.T.; Anderegg, W.R.L.; Verheggen, B.; Maibach, Ed W.; Carlton, J. S.; Lewandowsky, S.; Skuce, A.G. & Green, S.A. (2016), «Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming», *Environmental Research Letters* 11 (44), doi:10.1088/1748-9326/11/4/048002.048002
- Costantini, A.O., *et al.* (2018). Emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. CIENCIA E INVESTIGACIÓN-TOMO 68 Nº 5
- Cramer, W., *et al.*, Executive summary, in: Chapter 18: Detection and attribution of observed impacts (2014), pp.982-984, in IPCC AR5 WG2 A, 2014
- Crowley, Thomas J.; North, Gerald R. (1988), «Abrupt climate change and extinction events in Earth history», *Science* 240 (4855): 996-1002, ISSN 1095-9203, doi:10.1126/science.240.4855.996.
- Denton, F., *et al.* (2014). Section 20.3. Contributions to Resilience through Climate Change Responses, in: Chapter Climate-resilient pathways: adaptation, mitigation, and sustainable development, pp.1113-1118, in IPCC AR5 WG2 A.
- DiMento, J.F.C.; Doughman, P.M. (2007). *Climate Change: What It Means for Us, Our Children, and Our Grandchildren*. The MIT Press. p. 68. ISBN 978-0-262-54193-0.
- Doran, P.T. & Zimmerman, M.K. (2009). «Examining the Scientific Consensus on Climate Change». *EOS, Transactions American Geophysical Union* 90 (3): 22-23. Bibcode:2009EOSTr..90...22D. ISSN 2324-9250. doi:10.1029/2009EO030002.
- Dore, J.E.; Lukas, R.; Sadler, D.W.; et al. (2009), «Physical and biogeochemical modulation of ocean acidification in the central North Pacific», *PNAS* 106 (30): 12235-12240, ISSN 0027-8424, doi:10.1073/pnas.0906044106.

- Dunne, E.M.; Čalogović, J.; Pallé, E. & Laken, B.A. (2012). «A cosmic ray-climate link and cloud observations». *Journal of Space Weather and Space Climate* 2: A18. ISSN 2115-7251. doi:10.1051/swsc/2012018.
- Eddy J.A. (1976). «The Maunder Minimum». *Science* 192 (4245): 1189-202. Bibcode:1976Sci...192.1189E. PMID 17771739. doi:10.1126/science.192.4245.1189.
- FAO. *Cambio climático y seguridad alimentaria. Un documento marco. Resumen.*
- Feng, F. & Bailer-Jones, C. A. L. (2015). «Obliquity and precession as pacemakers of Pleistocene deglaciations». *arXiv:1505.02183 [astro-ph, physics:physics]*.
- Field, C.B., *et al.*(2014). Box TS.8: Adaptation Limits and Transformation, in: Technical summary, p.89, in IPCC AR5 WG2 A.
- Field, C.B., *et al.*(2014). Section A-3. The Decision-making Context, in: Technical summary, p.55, in IPCC AR5 WG2 A.
- Field, C.B., *et al.*(2014). Section B-1. Key Risks across Sectors and Regions, in: Technical summary, p.62, in IPCC AR5 WG2 A, 2014
- Fleming, J.R. (2006). «James Croll in Context: The Encounter between Climate Dynamics and Geology in the Second Half of the Nineteenth Century"». *History of Meteorology*.
- Frese, R.R.B. von; Potts, L.V.; Wells, S.B.; Leftwich, T.E.; Kim, H.R.; Kim, J.W.; Golynsky, A.V.; Hernandez, O. *et al.* (2009). «GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10 (2). ISSN 1525-2027. doi:10.1029/2008GC002149.
- Gareth S.J.P.A.; Stott, N.C. (2013). «Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations». *JGR: Atmospheres*. doi:10.1002/jgrd.50239.
- Global climatic effects of atmospheric dust from an asteroid or comet impact on Earth. (1994). *Global and Planetary Change* 9 (3-4): 263-273. ISSN 0921-8181. doi:10.1016/0921-8181(94)90020-5.
- Gray, L. J.; Beer, J.; Geller, M.; Haigh, J. D.; Lockwood, M.; Matthes, K.; Cubasch, U.; Fleitmann, D. *et al.* (2010). «Solar Influences on Climate». *Reviews of Geophysics* 48 (4). ISSN 1944-9208. doi:10.1029/2009RG000282.
- Gray, L. J.; Beer, J.; Geller, M.; Haigh, J. D.; Lockwood, M.; Matthes, K.; Cubasch, U.; Fleitmann, D. *et al.* (2010). «SOLAR INFLUENCES ON CLIMATE». *Reviews of Geophysics* 48 (4). ISSN 8755-1209. doi:10.1029/2009rg000282.
- Green Sahara: African Humid Periods Paced by Earth's Orbital Changes | Learn Science at Scitable. *www.nature.com*.
- Greenpeace. «Informe: Así nos afecta el cambio climático - ES». *Greenpeace España*.
- Gupta, S. *et al.* (2007). 13.2 Climate change and other related policies. IPCC AR4 WG3.
- Hansen, J. (2007), «Scientific reticence and sea level rise», *Environmental Research Letters*. 2 (2): 0204002, ISSN 1748-9326, doi:10.1088/1748-9326/2/2/024002.

- Hansen, J.; Sato, M.; Kharecha, P.; et al. (2007), «Climate change and trace gases», *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 365 (1866): 1925-1954, ISSN 1364-503X, doi:10.1098/rsta.2007.2052.
- Haug, G.H.; Haumann, F.A.; Kleiven, H.F.; Bernasconi, S.M.; Vance, D.; Hodell, D.A.; Sigman, D.M.; Martínez-García, A. et al. (2019). «The residence time of Southern Ocean surface waters and the 100 000-year ice age cycle». *Science* 363 (6431): 1080-1084. ISSN 0036-8075. PMID 30846597. doi:10.1126/science.aat7067.
- Haynes, S. (2019). «Students From 1,600 Cities Just Walked Out of School to Protest Climate Change. It Could Be Greta Thunberg's Biggest Strike Yet». *TIME*.
- Hegerl, G.C., et al.. (2007). «Ch 9: Understanding and Attributing Climate Change». *Executive Summary* (en inglés)., en IPCC AR4 WG1.
- Herrero, Y. (2022). *Competencia climática: una propuesta transversal sobre capacidades en Acción por el Empoderamiento Climático*.
- Heuvel, Van Den; J.E.P. (1966). «On the Precession as a Cause of Pleistocene Variations of the Atlantic Ocean Water Temperatures». *Geophysical Journal International* , 11 (3): 323-336. ISSN 0956-540X. doi:10.1111/j.1365-246X.1966.tb03086.x.
- Hughes, Lesley (2001), «Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?», *Trends in Ecology and Evolution* 15 (2): 56-61, ISSN 0169-5347, doi:10.1016/S0169-5347(99)01764-4.
- Huybers, P. (2006). «Early Pleistocene Glacial Cycles and the Integrated Summer Insolation Forcing». *Science* 313 (5786): 508-511. ISSN 1095-9203. PMID 16794041. doi:10.1126/science.1125249.
- Huybers, P. (2011). «Combined obliquity and precession pacing of late Pleistocene deglaciations». *Nature* 480 (7376): 229-232. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/nature10626.
- Huybers, P.; Raymo, M.E. (2008). «Unlocking the mysteries of the ice ages». *Nature* 451 (7176): 284-285. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/nature06589.
- IPCC (2001). J. T. Houghton et al., ed. *Climate change 2001: the scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521807670.
- IPCC (2007). «Resumen para responsables de políticas». En Pachauri, R. K. y Reisinger, A., ed. *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra: Cambridge University Press. ISBN 9291693227.
- IPCC AR5 SYR Glossary, (2014); IPCC SR15 Ch1, 2018, p. 51: «Global warming is defined in this report as an increase in combined surface air and sea surface temperatures averaged over the globe and over a 30-year period. Unless otherwise specified, warming is expressed relative to the period 1850–1900, used as an approximation of pre-industrial temperatures in AR5».
- IPCC AR5 SYR Summary for Policymakers, 2014, p. 2
- IPCC AR5 WG1 Ch5, 2013

IPCC AR5 WG1 Summary for Policymakers, 2013, p. 4

IPCC, (2013) «Summary for Policymakers», *Detection and Attribution of Climate Change*, ««It is extremely likely that human influence has been the dominant cause of the observed warming since the mid-20th century» (page 17) and «In this Summary for Policymakers, the following terms have been used to indicate the assessed likelihood of an outcome or a result: (...) extremely likely: 95–100%» (page 2).», in IPCC AR5 WG1, 2013.

IPCC, (2017). «Summary for Policymakers», *Magnitudes of impact*, in IPCC AR4 WG2, 2007

IPCC, (2007a). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IPCC, (2007b): *Climate Change 2007: Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*

IPCC, (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis - Summary for Policymakers, Observed Changes in the Climate System*, p. 15, in IPCC AR5 WG1.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

IPCC: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Anexe III Glossary*». https://archive.ipcc.ch/report/ar5/wg1/index_es.shtml. Consultado el 29 de diciembre de 2018.

Jackson, R. & A. Jenkins (2012). «Vital signs of the planet: global climate change and global warming: uncertainties». *Earth Science Communications Team at NASA's Jet Propulsion Laboratory / California Institute of Technology* .

James Trefil (2005). *Gestionemos la naturaleza*. Antoni Bosch editor. ISBN 978-84-95348-20-3.

Jin, Yu-gan; Jiang, Yao-fa; Zeng, Yong; Liu, Lu-jun; Liu, Xiao-lei; Tang, Yue-gang; Li, Wen-zhong; Mu, Lin *et al.* (2011). «Calibrating the End-Permian Mass Extinction». *Science* 334 (6061): 1367-1372. ISSN 1095-9203. PMID 22096103. doi:10.1126/science.1213454.

Julie Brigham-Grette *et al.* (2006). «Petroleum Geologists' Award to Novelist Crichton Is Inappropriate» (PDF). *Eos* 87 (36). «The AAPG stands alone among scientific societies in its denial of human-induced effects on global warming.»

Katz, M. (1999). «The Source and Fate of Massive Carbon Input During the Late Paleocene Thermal Maximum». *Science* 286 (Noviembre). pp. 1531-1533.

Kemp, Luke; Xu, Chi; Depledge, Joanna; Ebi, Kristie L.; Gibbins, Goodwin; Kohler, Timothy A.; Rockström, Johan; Scheffer, Marten *et al.* (2022). «Climate Endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios». *Proceedings of the National Academy of Sciences* (en inglés) 119 (34): e2108146119. ISSN 0027-8424. doi:10.1073/pnas.2108146119.

- Kennett, J. P.; Stott, L. D. (1991). «Abrupt deep-sea warming, palaeoceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Palaeocene». *Nature* 353. pp. 225-229.
- Knutti, Retto; Hegerl, Gabriele C. (2008), «The equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes», *Nature Geoscience* 1 (11): 735-743, ISSN 1752-0894, doi:10.1038/ngeo337, archivado desde el original el 11 de mayo de 2013.
- Kopp, Greg (2014). «An assessment of the solar irradiance record for climate studies». *Journal of Space Weather and Space Climate* 4: A14. ISSN 2115-7251. doi:10.1051/swsc/2014012.
- Kopp, G.; Lean, J.L. (2011). «A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance». *Geophysical Research Letters* 38 (1). ISSN 1944-8007. doi:10.1029/2010GL045777. de 2021.
- Krüger, T. (2013). *Discovering the Ice Ages: International Reception and Consequences for a Historical Understanding of Climate*. BRILL. ISBN 9789004241701.
- Kruse, E., ed. (2014). *Impacto del cambio climático en el gran La Plata* (1. ed edición). EDULP, Ed. de la Univ. de La Plata. ISBN 978-987-1985-42-5.
- Kump, L.R.; Upchurch, G.R.; Royer, D.L.; Lomax, B.H.; Beerling, D.J. (2002). «An atmospheric pCO₂ reconstruction across the Cretaceous-Tertiary boundary from leaf megafossils». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (12): 7836-7840. ISSN 1091-6490. PMID 12060729. doi:10.1073/pnas.122573099.
- Lean, J. (1997). «The sun's variable radiation and its relevance for earth». *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 35 (1): 33-67. ISSN 0066-4146. doi:10.1146/annurev.astro.35.1.33..
- Lean, J.; Wu, C. J.; Krivova, N.; Kopp, G. (2016). «The Impact of the Revised Sunspot Record on Solar Irradiance Reconstructions». *Solar Physics* 291 (9-10): 2951-2965. ISSN 1573-093X. doi:10.1007/s11207-016-0853-x.
- Lee, J.E.; Shen, A.; Fox-Kemper, B.; Ming, Y. (2017). «Hemispheric sea ice distribution sets the glacial tempo». *Geophysical Research Letters* 44 (2): 1008-1014. ISSN 1944-8007. doi:10.1002/2016GL071307.
- Lenton, T.M.; Rockström, J.; Gaffney, O.; Rahmstorf, S.; Richardson, K.; Steffen, W.; Schellnhuber, H.J. (2019). «Climate tipping points — too risky to bet against». *Nature*. 575 (7784): 592-595. doi:10.1038/d41586-019-03595-0.
- Lindsey, R. (2009). *Earth's Energy Budget (p.4), en: Climate and Earth's Energy Budget: Feature Articles*. Earth Observatory, part of the EOS Project Science Office, located at NASA Goddard Space Flight Center.
- Lisiecki, L.E. (2010). «Links between eccentricity forcing and the 100 000-year glacial cycle». *Nature Geoscience* 3 (5): 349-352. ISSN 1752-0908. doi:10.1038/ngeo828.
- Lo Vuolo, R.M. (2014). *Cambio climático, políticas ambientales y regímenes de protección social: Visiones para América Latina*.

- Lohmann, K.C.; Dutton, A.; Petersen, S.V. (2016). «End-Cretaceous extinction in Antarctica linked to both Deccan volcanism and meteorite impact via climate change». *Nature Communications* 7: 12079. ISSN 2041-1723. doi:10.1038/ncomms12079.
- Lorenz, E. (1963): «Deterministic nonperiodic flow», en *J. Atmos. Sci.*, n.º 20, págs. 130-141.
- Lu, J.; Vechhi, G.A.; Reichler, T. (2007). «Expansion of the Hadley cell under global warming» (PDF). *Geophysical Research Letters* 34 (6): L06805. Bibcode:2007. GeoRL..3406805L. ISSN 0094-8276. doi:10.1029/2006GL028443.
- Lynas, M.; Houlton, B.Z; Perry, S. (2021). «Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature». *Environmental Research Letters* 16 (11): 114005. ISSN 1748-9326. doi:10.1088/1748-9326/ac2966.
- Yáñez, M.V. *et al.* (2008). *Cambio climático en el Mediterráneo español*. Instituto Español de Oceanografía. ISBN 84-95877-39-2.
- Marshall, S.J. (2013). «Climate science: Solution proposed for ice-age mystery». *Nature* 500 (7461): 159-160. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/500159a.
- Martín, R.S.; Quiñonez, W.; LoPrete, D.V.; Rossi, P.V. (2023). «Radiación infrarroja y efecto invernadero». *Terrae Didactica* 19: e023004-e023004. ISSN 1980-4407. doi:10.20396/td.v19i00.8671534.
- Martín, R. «LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO EN PATAGONIA AUSTRAL, estudio de la evolución histórica de las comunidades de quironómidos (Diptera, Chironomidae) en la Laguna Azul, Santa Cruz, Argentina». *Marco Climático*.
- Maslin, M. (2016). «In retrospect: Forty years of linking orbits to ice ages». *Nature* 540 (7632): 208-210. ISSN 1476-4687. doi:10.1038/540208a.
- Meehl, G.A. «Ch 10: Global Climate Projections». *Sec 10.5.4.6 Synthesis of Projected Global Temperature at Year 2100*].
- Melosh, H.J. (2007). *Comet/Asteroid Impacts and Human Society*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 211-224. ISBN 9783540327097. doi:10.1007/978-3-540-32711-0_12.
- Michel, H.V.; Asaro, F.; Alvarez, W.; Alvarez, L.W. (1980). «Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction». *Science* 208 (4448): 1095-1108. ISSN 1095-9203. PMID 17783054. doi:10.1126/science.208.4448.1095.
- Milankovitch Cycles, Paleoclimatic Change, and Hominin Evolution | Learn Science at Scitable. www.nature.com.
- Milankovitch Orbital Data Viewer. biocycle.atmos.colostate.edu. Archivado desde el original el 8 de diciembre de 2018.
- Naomi O. (2004). «Beyond the Ivory Tower: The Scientific Consensus on Climate Change» (PDF). *Science* 306 (5702): 1686. PMID 15576594. doi:10.1126/science.1103618.
- Negra, M.H.; Sepúlveda, J.; Quinton, P.C.; MacLeod, K.G. (2018). «Postimpact earliest Paleogene warming shown by fish debris oxygen isotopes (El Kef, Tunisia)». *Science*: eaap8525. ISSN 1095-9203. PMID 29794216. doi:10.1126/science.aap8525.

- Oppenheimer, M., et al., (2014). *Section 19.6.2.2. The Role of Adaptation and Alternative Development Pathways*, in: Chapter 19: Emergent risks and key vulnerabilities (2014), pp.1072-1073, in IPCC AR5 WG2 A.
- Oppenheimer, M., et al., (2014). *Section 19.7.1: Relationship between Adaptation Efforts, Mitigation Efforts, and Residual Impacts*, in: Chapter 19: Emergent risks and key vulnerabilities (2014), pp.1080-1085, in IPCC AR5 WG2 A.
- Oreskes, N. (2004), «Beyond the ivory tower. The scientific consensus on climate change», *Science* 306 (5702): 1686, ISSN 1095-9203, doi:10.1126/science.1103618.
- Organización Meteorológica Mundial, ed. (2017). *Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas*. ISBN 978-92-63-311203-7 |isbn= incorrecto (ayuda).
- Paillard, D. (2006). «What Drives the Ice Age Cycle?». *Science* 313 (5786): 455-456. ISSN 1095-9203. PMID 16873636. doi:10.1126/science.1131297.
- Parry, M.L., et al., «Technical summary», *Box TS.6. The main projected impacts for regions*, en IPCC AR4 WG2, 2007, pp. 59-63
- Peter, U.; Clark et al. 2016 *Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change*. *Nature Climate Change* 6: 360-369. doi:10.1038/NCLIMATE2923.
- Planelles, M. (2019). «El grito de los jóvenes contra el cambio climático se convierte en global». *El País*. ISSN 1134-6582.
- Porter, J.R., et al., (2014) Executive summary, in: Chapter 7: Food security and food production systems, in IPCC AR5 WG2 A, 2014, pp. 488–489
- Riccomini, C.; Warren, L.; Jourdan, F.; Mendes, P.S.T.; Lana, C.; Schmieder, M.; Tohver, E. (2018). «End-Permian impactogenic earthquake and tsunami deposits in the intracratonic Paraná Basin of Brazil». *GSA Bulletin* 130 (7-8): 1099-1120. ISSN 0016-7606. doi:10.1130/B31626.1.
- Riebeek, H. (2011). «The Carbon Cycle: Feature Articles: Effects of Changing the Carbon Cycle». *Earth Observatory, part of the EOS Project Science Office located at NASA Goddard Space Flight Center*.
- Ritchie, H.; Roser, M. (2020). «CO₂ and Greenhouse Gas Emissions». *Our World in Data*.
- Rocca, M.C.L.; Rampino, M.R.; Presser, J.L.B. (2017). «Geophysical evidence for a large impact structure on the Falkland (Malvinas) Plateau». *Terra Nova* 29 (4): 233-237. ISSN 1365-3121. doi:10.1111/ter.12269.
- Roe, G.H.; Baker, M.B. (2007), «Why is climate sensitivity so unpredictable?», *Science* 318 (5850): 629-632, ISSN 1095-9203, doi:10.1126/science.1144735.
- Royal Society (2005). *Economic Affairs – Written Evidence*. The Economics of Climate Change, the Second Report of the 2005–2006 session, produced by the UK Parliament House of Lords Economics Affairs Select Committee. UK Parliament website.

- Sandy P.; Harrison P.J.; Bartlein I.; Colin P. «What have we learnt from palaeoclimate simulations?». *Journal of Quaternary Science*. ISSN 0267-8179. doi:10.1002/jqs.2842..
- Schnellhuber, H.J. (2008), «Global warming: Stop worrying, start panicking?», *PNAS* 105 (38): 14239-14240, ISSN 0027-8424, doi:10.1073/pnas.0807331105.
- Schrag, D.P.; Berner, R.A.; Hoffman, P.F.; Halverson, G.P. (2002). «On the initiation of a snowball Earth». *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (en inglés) 3 (6): 1-21. ISSN 1525-2027. doi:10.1029/2001GC000219.
- Shackleton, N.J.; Imbrie, J.; Hays, J.D. (1976). «Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages». *Science* 194 (4270): 1121-1132. ISSN 1095-9203. PMID 17790893. doi:10.1126/science.194.4270.1121.
- Siegenthaler, U.; Sarmiento, J.L. (1993), «Atmospheric carbon dioxide and the ocean», *Nature* 365 (6442): 119-125, ISSN 0028-0836, doi:10.1038/365119a0.
- Skinner, L.C.; Kleiven, H.F.; Hodell, D.A.; Channell, J.E.T.; Tzedakis, P.C. (2012). «Determining the natural length of the current interglacial». *Nature Geoscience* 5 (2): 138-141. ISSN 1752-0908. doi:10.1038/ngeo1358.
- Sloan, T.; Wolfendale, A.W. (2013). «Cosmic rays, solar activity and the climate». *Environmental Research Letters* 8 (4): 045022. ISSN 1748-9326. doi:10.1088/1748-9326/8/4/045022.
- Smit, J.; Mundil, R.; Morgan, L.E.; Mitchell, W.S.; Mark, D.F.; Kuiper, K.F.; Hilgen, F.J.; Deino, A.L. *et al.* (2013). «Time Scales of Critical Events Around the Cretaceous-Paleogene Boundary». *Science* 339 (6120): 684-687. ISSN 1095-9203. PMID 23393261. doi:10.1126/science.1230492.
- Smith, J.B. (2001). «Ch. 19. Vulnerability to Climate Change and Reasons for Concern: A Synthesis». *Sec 19.6. Extreme and Irreversible Effects*. IPCC TAR WG2.
- Smith, J.B.; Schneider, S.H.; Oppenheimer, M.; Yohe, G.W.; Hare, W.; Mastrandrea, M.D.; Patwardhan, A.; Burton, I.; Corfee-Morlot, J.; Magadza, C.H.D; Füssel, H.M.; Pittock, A.B.; Rahman, A.; Suarez, A.; van Ypersele, J.P. (2009). «Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 'reasons for concern'». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (11): 4133-7. PMC 2648893. PMID 19251662. doi:10.1073/pnas.0812355106.
- SPM.4.1 (2014). Long-term mitigation pathways, in: Summary for Policymakers, pp.11-15 (2014) in IPCC AR5 WG3.
- Stainforth, D.A.; Aina, T.; Christensen, C.; et al (2005), «Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases», *Nature* 433 (7024): 403-406, ISSN 0028-0836, doi:10.1038/nature03301.
- Stenhouse, N.; Maibach, E.; Cobb, S.; Ban, R.; Bleistein, A.; Croft, P.; Bierly, E.; Seitter, K.; Rasmussen, G.; Leiserowitz, A. (2013). «Meteorologists' Views About Global Warming: A Survey of American Meteorological Society Professional Members». *Bulletin of the*

- American Meteorological Society* 95 (7): 1029-1040. ISSN 0003-0007. doi:10.1175/BAMS-D-13-00091.1.
- Stern, N. (2008), «The economics of climate change», *American Economic Review*. 98 (2): 1-37, ISSN 0002-8282, doi:10.1257/aer.98.2.1.
- Stokes, B.; Wike, R.; Carle, J. (2015). «Global Concern about Climate Change, Broad Support for Limiting Emissions: U.S., China Less Worried; Partisan Divides in Key Countries». *Pew Research Center*.
- Sutter, J.D.; Berlinger, J. (2015). «Final draft of climate deal formally accepted in Paris». *CNN*. Cable News Network, Turner Broadcasting System, Inc.
- Svensmark, H. (2007), «Cosmoclimatology: a new theory emerges», *Astronomy & Geophysics* 48 (1): 1.18-1.24, ISSN 1366-8781, doi:10.1111/j.1468-4004.2007.48118.x.
- Toon, O.B.; Zahnle, K.; Morrison, D.; Turco, R.P.; Covey, C. (1997). «Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets». *Reviews of Geophysics* 35 (1): 41-78. ISSN 1944-9208. doi:10.1029/96RG03038.
- UNESCO (2015). *Not Just Hot Air: Putting Climate Change Education into Practice*. Paris, UNESCO. pp. 6, 8, 10, 32, 40, 44, 46, 48, 58. ISBN 978-92-3-100101-7.
- US National Research Council (2003). «Ch. 1 Introduction». *Understanding Climate Change Feedbacks* (en inglés). Washington, D.C., EE. UU.: National Academies Press., p.19
- US National Research Council (2006). «Ch. 1 Introduction to Technical Chapters». *Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years*. Washington, D.C., EE. UU.: National Academies Press. pp. 26-27.
- Vaughan, A. (2015). «Paris climate deal: key points at a glance». *The Guardian* (London and Manchester, UK). Archivado desde el original el 1 de agosto de 2016.
- Verheggen, B.; Strengers, B.; Cook, J.; van Dorland, R.; Vringer, K.; Peters, J.; Visser, H.; Meyer, L. (2014). «Scientists' Views about Attribution of Global Warming». *Environmental Science & Technology* 48 (16): 8963-8971. ISSN 0013-936X. doi:10.1021/es501998e.
- Wallace-Wells, D. (2017). «The Uninhabitable Earth». *New York Magazine*.
- Walther, G.R.; Post, E.; Convey, P.; et al. (2002), «Ecological responses to recent climate change», *Nature* 416 (6879): 389-395, ISSN 0028-0836, doi:10.1038/416389a.
- Wang, Z.; Mysak, L.A.; Cochelin, A.S.B. (2006). «Simulation of long-term future climate changes with the green McGill paleoclimate model: the next glacial inception». *Climatic Change* 79 (3-4): 381-401. ISSN 1573-1480. doi:10.1007/s10584-006-9099-1.
- William F.R. (2008). *Los tres jinetes del cambio climático*. Turner. ISBN 978-84-7506-852-7.
- Willumsen, P.S.; Whalen, M.T.; Vajda, V.; Urrutia-Fucugauchi, J.; Sweet, A.R.; Speijer, R.P.; Salge, T.; Robin, E. *et al.* (2010). «The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary». *Science* 327 (5970): 1214-1218. ISSN 1095-9203. PMID 20203042. doi:10.1126/science.1177265.
- Wolfendale, A.W.; Sloan, T.; Erylkin, A.D. (2013). «A review of the relevance of the 'CLOUD' results and other recent observations to the possible effect of cosmic rays on the terrestrial

climate». *Meteorology and Atmospheric Physics*. 121 (3-4): 137-142. ISSN 1436-5065. doi:10.1007/s00703-013-0260-x.

Wu, H.; Williams, J.; Viau, A.E.; Thompson, R.S.; Sugita, S.; Shuman, B.; Seppä, H.; Scholze, M. *et al.* (2011). «Pollen-based continental climate reconstructions at 6 and 21 ka: a global synthesis». *Climate Dynamics* 37 (3-4): 775-802. ISSN 1432-0894. doi:10.1007/s00382-010-0904-1.