



Mudanças Climáticas: Roteiro de Estudos

Oswaldo Lucon



1ª Edição

IEE-USP, São Paulo, 2022

Mudanças Climáticas: Roteiro de Estudos

Oswaldo Lucon

1ª Edição

São Paulo, 2022

DOI: xxxxxxxxx

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e autoria, proibindo qualquer uso para fins comerciais.

Ficha Catalográfica

Mudanças Climáticas: Roteiro de Estudos /
Oswaldo Lucon - São Paulo: IEE - USP, 2022
79p.

ISBN xxxx

DOI: yyyy

1. Mudança climática 2. Educação ambiental I. Lucon, Oswaldo dos Santos

Apresentação

A temática de Mudanças Climáticas é considerada por muitos algo extremamente complexo e inatingível. Isso faz com que a sociedade não se aproprie da tomada de decisão, considerada necessária pelos cientistas e reconhecida pelos acordos internacionais que buscam a proteção do sistema climático global. O senso de urgência propõe que ocorra uma transformação nos sistemas humanos - econômicos e sociais - compatível com as intensas e rápidas mudanças que estão ocorrendo no meio ambiente.

Todos intuitivamente sabem ser necessárias ações que levem a mudanças de comportamento, mas a distância entre os cientistas e os professores cria uma certa relutância em explorar o tema, fazendo com que nas escolas de ensinos fundamental e médio este seja tratado de maneira superficial e fragmentada.

Isso abre caminho também para que a desinformação se propague por outros meios, principalmente por redes sociais, mas também por grandes veículos de comunicação. O resultado prejudica a qualidade das propostas e subsequente implementação de políticas e outras medidas por agentes públicos e privados.

A proposta dessa obra é auxiliar os educadores a transmitir essa informação de forma objetiva e estruturada, ampliando o alcance e a profundidade do conhecimento. Ela foi realizada tomando por base principalmente o recente Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas ou IPCC (2021, 2022), do qual participei como autor.

Contribuindo há um quarto de século para o Painel, raros foram os dias em que não tentei agir junto a tomadores de decisão e formadores de opinião. Chego a uma conclusão: é preciso fazer a grama crescer debaixo das árvores.

Dessa forma, ancorada na melhor ciência disponível, é proposta aqui uma metodologia inovadora e até certo ponto disruptiva, que espera despertar maior interesse da classe estudantil em todos os níveis e idades.

Oswaldo Lucon

em São Paulo, Brasil, junho de 2022

Sumário

A Proposta	1
Parte 1. Ciência do Clima	3
Eventos extremos e crônicos, retroalimentação	7
Emissões de gases de efeito estufa	8
Aerossóis	9
Albedo e outras causas	10
Forçantes radiativas	11
Evidências e Efeitos, Incertezas	11
Modelos, Cenários, Linhas de Base e Limites	12
Parte 2. Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação	17
Impactos	17
Vulnerabilidades	20
Adaptação e Resiliência	20
Detecção e Atribuição	21
Cenários	21
Parte 3. Mitigação	29
Medidas Setoriais	30
Medidas Sistêmicas	41
Um exercício simples	44
Finanças climáticas	47
Governança	47
Informação, Capacitação, Educação e Transferência de Tecnologia	52
Mensagem final	53
Perguntas Frequentes	55
Ferramentas de Ensino	59
Para iniciar	59
Estágios intermediários	59
Estágios mais avançados	60
Plataformas interativas	61
Referências	70

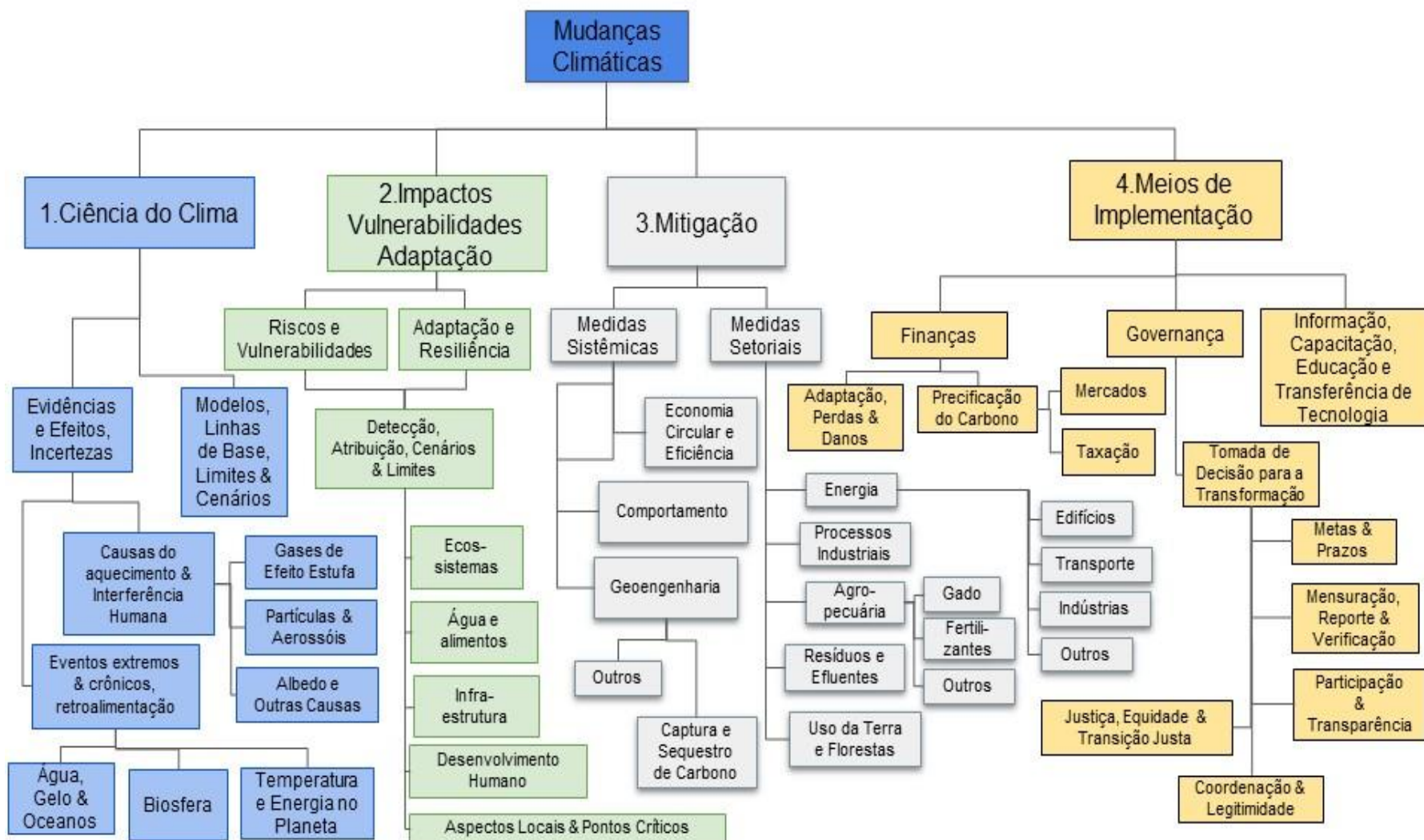
A Proposta

Esta obra busca apresentar, a partir de um mapa mental temático, ferramentas modernas e interativas para o aprendizado na área de Clima, de forma a classificar os principais temas e subtemas de forma não exaustiva, porém harmonizada em conformidade com os relatórios científicos e negociações entre os países.

O fluxograma a seguir sintetiza esta proposta, cujo roteiro que se segue a torna mais acessível e didática. Em que pesem os diversos aspectos transversais envolvidos, a temática Mudanças Climáticas foi dividida em

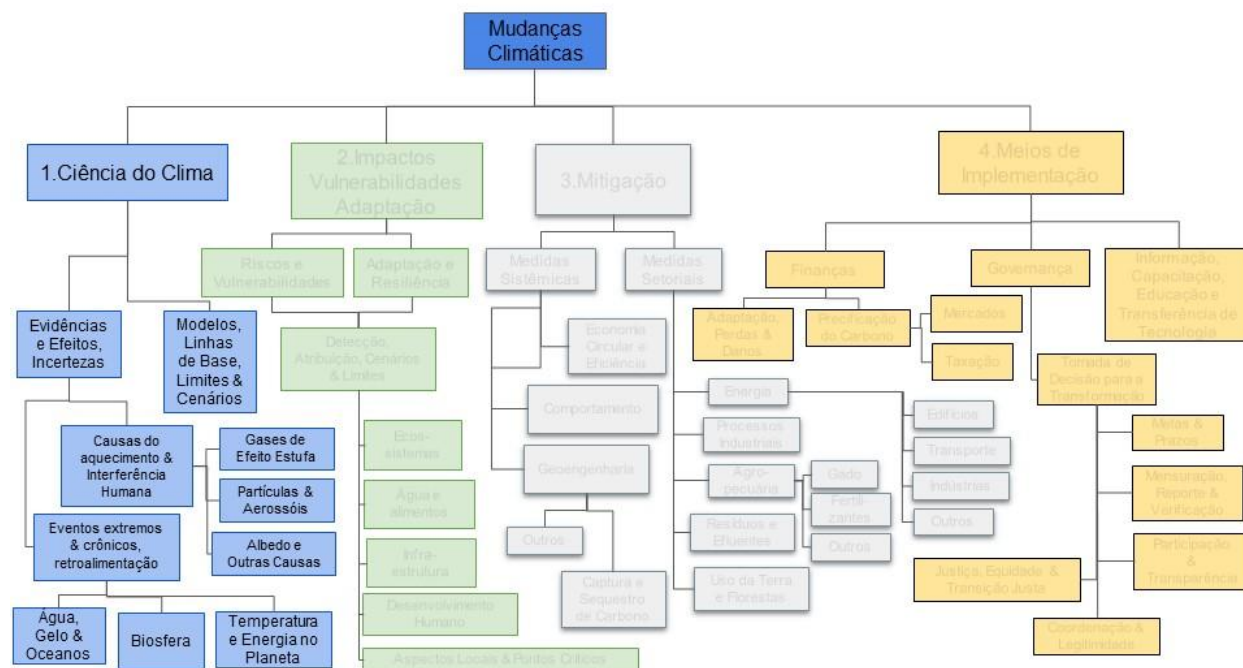
- Em azul, a **Ciência do Clima**, estudo do clima no planeta, seus principais efeitos e as mudanças que estão ocorrendo por conta do aquecimento global causado pelo homem;
- Em verde, **Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação**, ou seja, o que está sendo atingido por essas mudanças, de que forma e como minimizar as consequências consideradas negativas;
- Em verde mais claro, a **Mitigação**, isto é, como atenuar as causas antropogênicas (humanas) do aquecimento global visando manter as condições de vida na Terra; e,
- Em laranja, os **Meios de Implementação**, conjunto de formas e instrumentos para a tomada de decisão.

Veremos cada um desses tópicos de forma mais detalhada.



Sistematização proposta para a compreensão de Mudanças Climáticas (elaboração própria).

Parte 1. Ciência do Clima



Sistematização parte 1, Ciência do Clima e temas associados (elaboração própria).

Fonte da vida no planeta Terra, o Sol é a primeira fonte de energia do nosso sistema climático. A luz do Sol ilumina e aquece a superfície terrestre, os oceanos e a atmosfera. Parte dessa luz solar é refletida de volta ao espaço pela superfície, nuvens ou gelo. Grande parte da luz solar que chega à Terra é absorvida e aquece o planeta. Numa situação de equilíbrio, a Terra emite a mesma quantidade de energia que absorve e sua temperatura média permanece estável. O ciclo anual das estações e as mudanças de temperatura associadas ocorrem em função da inclinação do eixo da Terra em relação à sua órbita ao redor do Sol, sendo previsíveis a duração da luz do dia e a quantidade de luz solar recebida em qualquer latitude ao longo de um ano. Mudanças graduais na rotação e órbita da Terra ao redor do Sol ocorrem em ciclos de 100.000 anos, levando a eras glaciais e períodos quentes. Nas últimas décadas, contudo, esse quadro vem se alterando e a Terra vem se aquecendo.

O clima da Terra é influenciado por complexas interações envolvendo o Sol, oceano, atmosfera, nuvens, gelo, terra e vida. Ele varia de região para região como resultado de diferenças locais nessas interações. Os oceanos cobrem 70% da superfície da Terra e exercem um grande controle sobre o clima, dominando os ciclos de energia e água da Terra. Com capacidade de absorver grandes quantidades de energia solar, redistribuem o calor e o vapor de água das correntes marinhas e da circulação atmosférica.

Esse equilíbrio pode ser alterado quando há um desequilíbrio no *balanço energético* do planeta: a diferença entre o que entra e o que sai. A quantidade de energia solar absorvida ou irradiada pela Terra é modulada pela atmosfera e depende de sua composição. O vapor d' água e os gases - dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) - ocorrem naturalmente em pequenas quantidades relativamente ao nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2), gases atmosféricos mais abundantes que compõem cerca de 99% do total da atmosfera. Aqueles, contudo, absorvem e liberam energia térmica com mais eficiência. Assim, pequenos aumentos em suas concentrações exercem grandes efeitos no sistema climático, razão pela qual são chamados de *gases de efeito estufa* (ou GEE).



Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre e os gases de efeito estufa (NASA Climate Change, 2012 via Wikimedia Commons)

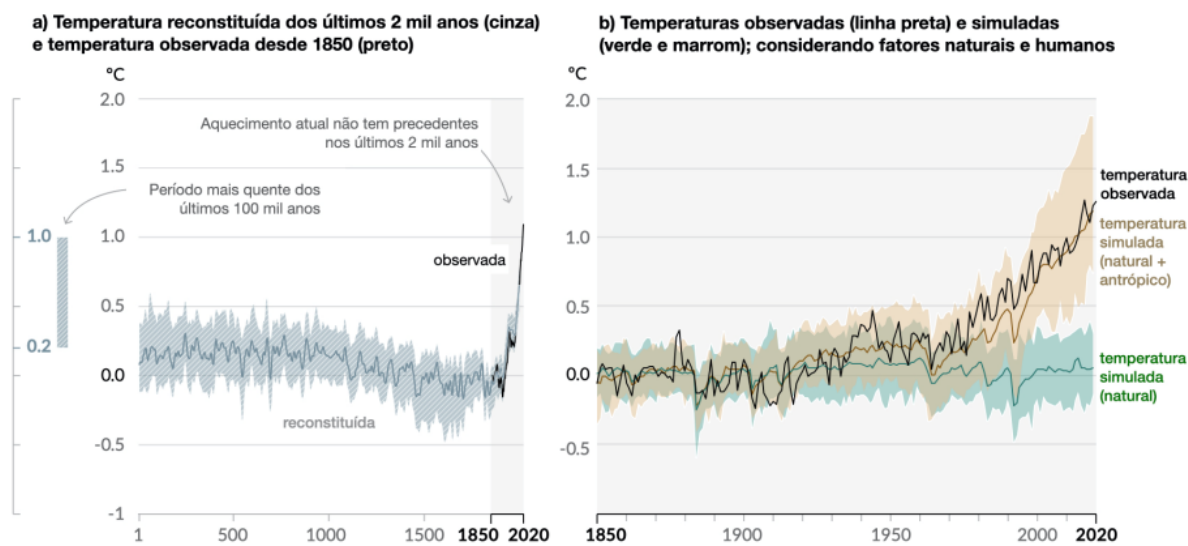
Ciclos naturais biogeoquímicos movem continuamente esses componentes entre seus reservatórios oceano, terra, vida e atmosfera. A abundância de dióxido de carbono e metano na atmosfera é reduzida pelo acúmulo de sedimentos marinhos no fundo do mar e acúmulo de biomassa vegetal. Por outro lado, ela é aumentada pelo desmatamento e pela queima de combustíveis fósseis, bem como por outros processos.

Com o progresso tecnológico, as atividades humanas são capazes de deslocar massas de materiais comparáveis às forças naturais geológicas. A definição desta nova era - o *Antropoceno* - foi cunhada em 1922 pelo geólogo russo Aleksei Pavlov e cem anos depois reconhecida pela União Internacional de Ciências Geológicas (IUGS). Períodos anteriores duraram centenas de milhões de anos. A influência humana sobre o planeta é clara: detonações nucleares, acidificação e lixo nos oceanos, movimentos de terra e de água doce, desmatamento e extinção de espécies, uso em larga escala de combustíveis fósseis são algumas das evidências.

Isso ocorre também na atmosfera, fina camada com 100 quilômetros de gases e partículas que circunda o nosso planeta - cujo raio são 6 mil quilômetros. As atividades humanas são significativas a ponto de nas últimas décadas terem alterado consideravelmente a composição dos gases atmosféricos.

Os GEE são gases-traços que impedem que o calor da Terra retorne ao espaço, como se fossem um cobertor ou um pára-brisa de carro fechado exposto ao sol. Este é o chamado *aquecimento global*. Além do dióxido de carbono e metano, também contribuem para o *efeito estufa* o óxido nitroso (N_2O), os perfluorocarbonos (PFCs), os clorofluorocarbonos (CFCs), os hidrofluorcarbonetos (HFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF_6) e o ozônio (O_3), além do vapor d'água (H_2O). O aquecimento global é, assim, causado pelo aumento nas concentrações globais de certos gases, o que vem ocorrendo desde a Revolução Industrial por conta das atividades humanas. Hoje, são mais abundantes na atmosfera da Terra do que em qualquer outro momento nos últimos 800 mil anos. Outras causas estudadas são os aerossóis e os efeitos de absorção de luz convertendo em calor, chamados de *albedo*. A soma desses componentes tem significativos efeitos nos sistemas do clima global, de uma forma simplificada chamados de mudanças climáticas.

Mudança na temperatura de superfície global, relativa a 1850-1900



Fonte: IPCC AR6 WGI / Jornal da USP (adaptado da versão original em inglês)

Fonte: IPCC AR6 WGI / Jornal da USP (adaptado da versão original em inglês)

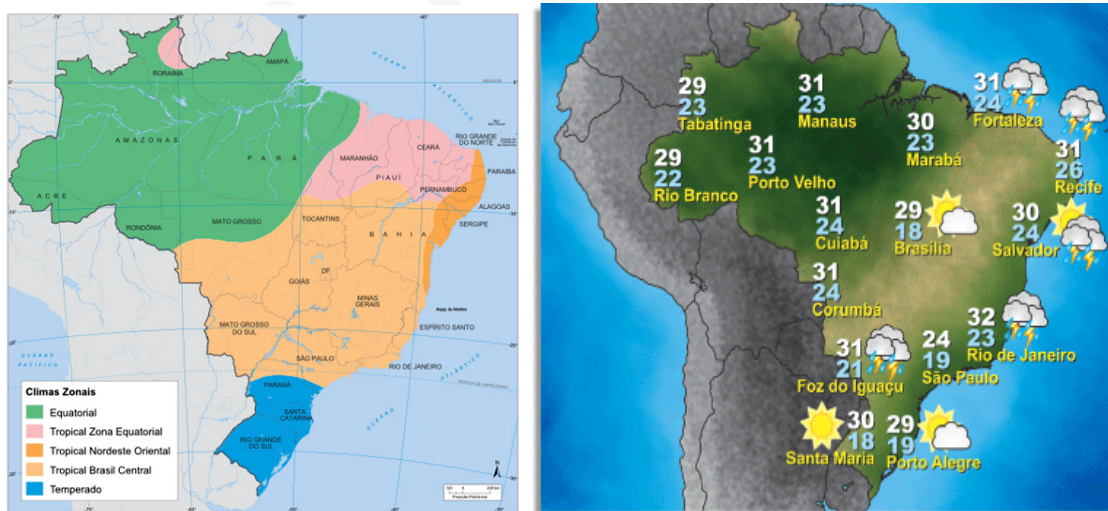
Estimativas da variação da temperatura média da superfície da Terra nos últimos 2000 anos (à esquerda) e mudanças na temperatura média anual da superfície da Terra conforme observações e simulações utilizando fatores naturais (Escobar e Magalhães, 2021, baseado em IPCC 2021)

A idéia de que os humanos podem mudar o clima da Terra emitindo grandes quantidades de dióxido de carbono e outros gases não é recente. Uma linha do tempo bastante sintética destaca:

- Nos anos 1820 o cientista e matemático francês Jean Fourier investigava o comportamento do calor na Terra. O planeta era pequeno demais e longe demais do Sol para se aquecer, a radiação não seria suficiente para mantê-lo vivo. Ele então concebeu a idéia de um cobertor atmosférico, descrito como efeito estufa.
- Em 1869 o físico irlandês John Tyndall pesquisou a dispersão de luz em diferentes comprimentos de onda (como ocorre no arco-íris e no céu azul), a absorção e transmissão de calor através do vapor d'água e gases atmosféricos.
- Em 1896 o químico sueco Svante Arrhenius e seu colega Arvid Hogbom observaram a queima de carvão nas fábricas e estimaram que dobrar os níveis de ácido carbônico (ou seja, dióxido de carbono) na atmosfera aqueceria a temperatura média da superfície da Terra em vários graus Celsius.
- Em 1956 o físico canadense Gilbert Plass afirmou que a duplicação dos níveis de dióxido de carbono na atmosfera resultaria em um aquecimento de 3-4°C
- Em 1958, o oceanógrafo Roger Revelle e colegas concluíram que até o ano 2000, o aumento do CO₂ atmosférico poderia ser suficiente para produzir mudanças mensuráveis e marcadas no clima. Nesse mesmo ano, seu colega Charles Keeling começou a medir os níveis de CO₂ na montanha de Mauna Loa, Havaí, que continuam até hoje e são a mais conhecida referência para evidenciar os efeitos humanos no sistema climático global.
- Em 1967 o primeiro modelo computacional simulando o clima de todo o planeta foi desenvolvido por Syukuro Manabe e Richard Wetherald;
- Em 1988, o cientista climático James Hansen testemunhou ao Congresso dos EUA que o aquecimento global já estava acontecendo. No mesmo ano, a Organização Meteorológica Mundial e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que a partir de 1990 publicou diversos relatórios de avaliação científica que subsidiam as negociações internacionais na área de clima.

- Em 1992 mais de 190 países assinaram a Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima, importante reconhecimento formal das evidências científicas. As negociações e a ciência avançaram. Em 1997 na CoP3 foi proposto o Protocolo de Quioto, que entrou em vigor em 2006. Em 2015 foi lançado o Acordo de Paris, durante a 21ª Conferência das Partes desta Convenção (também chamada por seu acrônimo em inglês *CoP21*), estabelecendo limites de referência para o aumento admissível na temperatura média do planeta neste século.
- Em 2021, o 6º Relatório de Avaliação do IPCC (2021, 2022) reconheceu que é inequívoco que a influência humana aquece a atmosfera, o oceano e a terra. Ocorreram mudanças amplas e rápidas na atmosfera, oceano, criosfera (gelo) e biosfera. As temperaturas da superfície global em 2001-2020 foram 1°C mais altas do que em 1850-1900, contribuindo para mudanças generalizadas no clima e extremos climáticos mais frequentes. Para conter esse quadro são necessárias ações transformacionais de mitigação das emissões e adaptação aos efeitos do aquecimento global. Os três volumes do Relatório apresentam formas para viabilizar esses objetivos, em termos de meios de implementação.

Uma das Ciências da Terra, a *Ciência do Clima ou Climatologia* investiga a estrutura e a dinâmica do sistema climático do nosso planeta, sob condições médias em um período de pelo menos 30 anos. Ela busca entender como os climas globais, regionais e locais são mantidos, bem como os processos pelos quais eles mudam ao longo do tempo. Ao fazê-lo, emprega observações e teorias de vários domínios, incluindo meteorologia, oceanografia, física e biogeoquímica.



Clima (esquerda) e tempo (à direita), conforme IBGE (2022) e Catalani (2022)

Como vimos, a climatologia está fortemente ligada à questão das mudanças climáticas *antropogênicas* - isto é, causadas pelo homem – mas não se restringe apenas a estas. Aspectos fundamentais sobre o funcionamento do sistema climático incluem a forma como a energia flui no sistema, os papéis de processos físicos particulares na formação de climas, as interações que ocorrem entre os componentes do sistema climático, as oscilações naturais dentro do sistema, as retroalimentações (ou *feedbacks*) do sistema climático, a previsibilidade do clima e muitos outros mais.

Eventos extremos e crônicos, retroalimentação

A crise climática reconhecidamente causada pelo aquecimento global ameaça a sociedade moderna e a ação para combatê-la continua sendo uma prioridade dos governos e da sociedade. Já há consequências irreversíveis da influência humana nos ecossistemas terrestres e marinhos, acentuadas pelos eventos climáticos mais frequentes e intensos. Tais eventos impactam também severamente a saúde pública, a economia e o bem-estar humano.

Eventos crônicos são o aumento das temperaturas médias, a elevação do nível do mar, as alterações em precipitação, a acidificação dos oceanos e a perda de biodiversidade. *Eventos extremos*, com intensidade e frequência cada vez maior, são tempestades e furacões, chuvas e secas intensas, ondas de calor e de frio, inundações e incêndios, deslizamentos de encostas e muitos outros desastres naturais.

É importante lembrar que há desastres naturais não causados pelo aquecimento global: erupções vulcânicas, terremotos e maremotos se enquadram nessa categoria.

A retroalimentação (ou *feedback*) é o processo no qual a mudança de uma quantidade altera uma segunda quantidade, e a mudança na segunda quantidade, por sua vez, altera a primeira. Essas quantidades são em termos de forçantes, ações que causam o aquecimento global. As forçantes podem ser concentrações de gases de efeito estufa ou mudanças nas condições de refletividade dos raios solares (albedo), nos quais a luz incide sobre uma dada superfície e em parte é absorvida sob a forma de calor. Um exemplo é o calor que derrete geleiras, expondo pântanos e liberando gás metano aprisionado por vários séculos, gás este que aumenta o aquecimento global e com isso o calor sobre as geleiras. Outro são os incêndios florestais amplificados por ondas de calor, causando desmatamento e desertificação, causando mais ondas de calor que aumentam as secas e espalham ainda mais os incêndios florestais.

Emissões de gases de efeito estufa

Como já foi citado, os principais gases de efeito estufa - GEE - são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e os fluorados (ou gases-F).

O dióxido de carbono (CO_2) é gerado principalmente através da queima de combustíveis fósseis (carvão, gás natural e petróleo), resíduos sólidos, árvores e outros materiais biológicos. É também resultado de

certas reações químicas, como as envolvidas na fabricação de cimento e aço. O dióxido de carbono é removido da atmosfera (ou "sequestrado") quando é absorvido pelas plantas durante a fotossíntese (parte do ciclo biológico do carbono). O CO_2 também é emitido por vulcões e outras fontes naturais.

O *metano* (CH_4) é emitido durante a produção e transporte de carvão, gás natural e petróleo. A queima incompleta desses combustíveis fósseis, bem como da lenha e outras formas de biomassa, também emite gás metano. As emissões de metano resultam ainda da pecuária (o chamado "arroto do boi" causado pela *fermentação entérica* ou ruminação) e outras práticas agrícolas (cultivo de arroz), uso da terra e pela decomposição de resíduos orgânicos em aterros de resíduos sólidos municipais. De forma natural, o metano é emitido por pântanos (e outros locais onde há decomposição de matéria orgânica com pouca presença de oxigênio, também chamada de *anaeróbica*), bem como pelo derretimento de geleiras que aprisionaram na pré-história este gás.

Óxido nitroso (N_2O) é um gás emitido durante as atividades agrícolas, de uso da terra e industriais; processos de queima e durante o tratamento de águas residuais. Fertilizantes sintéticos e resíduos animais emitem N_2O . As emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) gerados pela combustão a temperaturas altas levam, na atmosfera, a alguma formação de N_2O .

Os *gases-F* (fluorados, isto é, compostos pelo elemento flúor) são os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF_6) e o trifluoreto de nitrogênio (NF_3). São substâncias sintéticas utilizadas em aplicações (como refrigeração e ar condicionado) e processos industriais (para eletrônicos, por exemplo). Apesar de serem emitidos em quantidades menores do que outros GEE, suas moléculas são relativamente muito mais potentes para causar o aquecimento global.

Esse potencial de aquecimento global (cuja sigla em inglês é *GWP*) é uma unidade de medida relativa ao CO_2 : o do metano ou CH_4 é 28 vezes maior e o do N_2O é 265 vezes. Gases-F possuem *GWPs* que chegam a 12.300 (caso do HFC-23 ou CHF_3). Assim, cada molécula emitida é mais potente que a de CO_2 em função dos seus *GWP*.

Outro gás que provoca o aumento do efeito estufa é o *Ozônio* (O_3), formado na atmosfera pelo efeito da luz solar sobre substâncias que são seus precursores - os *Óxidos de Nitrogênio* (NO_x) e a família dos *Compostos Orgânicos Voláteis* (COVs). Além de causarem - direta ou indiretamente - o aumento do efeito estufa, essas substâncias são tóxicas e, portanto, regulamentadas como poluentes. Os NO_x são gerados a partir de reações de queima (nitrogênio do ar ou presente nos combustíveis em presença de oxigênio). Os COVs são substâncias evaporativas, como combustíveis derivados de petróleo não queimados, solventes e até essências de certas árvores (terpenos de eucaliptos e *pinus*). Diferentemente dos outros GEE citados anteriormente, o ozônio não é controlado pelos acordos internacionais na área de clima.

Aerossóis

Os *aerossóis* referem-se a partículas finas sólidas ou líquidas suspensas na atmosfera, onde residem normalmente por dias a semanas antes de se depositarem nas superfícies ou serem lavadas pela chuva ou neve. Eles surgem tanto de atividades humanas que envolvem a queima de combustíveis fósseis,

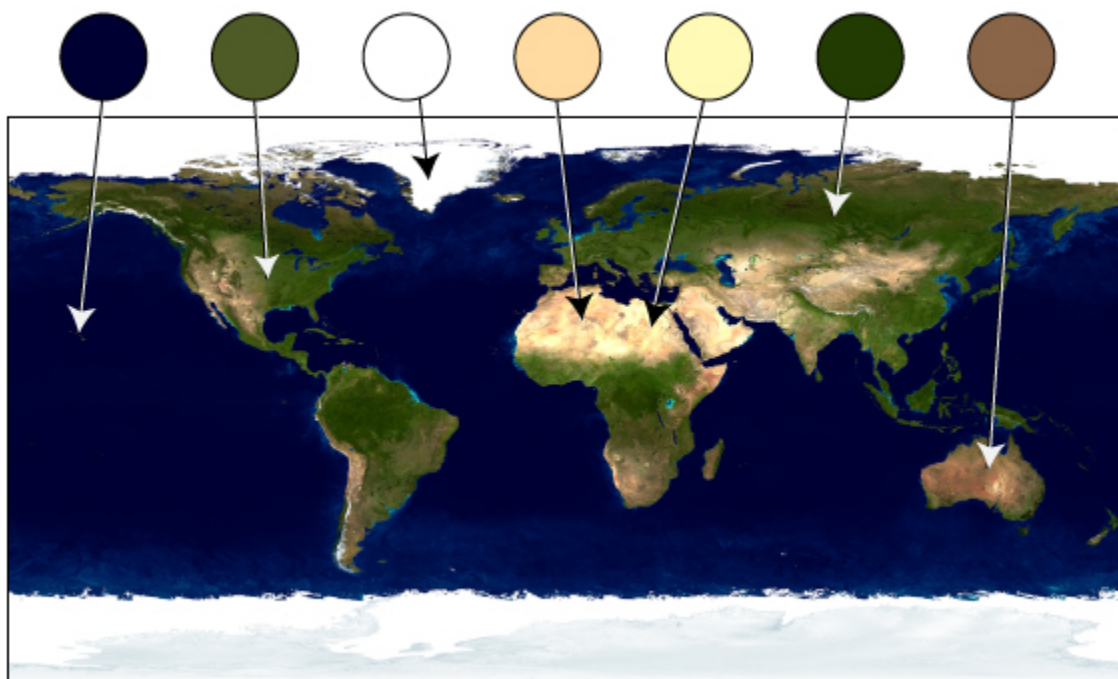
biocombustíveis e vegetais (fuligem e material particulado) quanto de fontes naturais (como poeira do deserto, maresia e erupções vulcânicas). As partículas de aerossol são pequenas, mas numerosas, e muitas vezes são compostas por várias substâncias inorgânicas e orgânicas. Gotículas de água também compõem os aerossóis. Os particulados, além de poluentes, também causam efeitos na refletividade dos raios solares. Formas visíveis de plumas de aerossóis atmosféricos incluem fumaça, neblina, poeira e suas combinações (*smog*).

Os aerossóis têm um efeito complexo no equilíbrio energético da Terra: podem causar tanto resfriamento, refletindo a luz solar recebida de volta ao espaço, quanto aquecimento, absorvendo e liberando energia térmica na atmosfera.

Os aerossóis podem influenciar o clima da Terra de duas maneiras. Quando o céu está claro (sem nuvens), os aerossóis podem refletir a luz solar de volta ao espaço sideral – o efeito direto. Isso bloqueia parte da energia que teria chegado à superfície, tendo um efeito de resfriamento no clima. A absorção de aerossóis (especialmente a fuligem e outras formas de carbono negro) pode reter a energia solar na atmosfera. Embora a absorção, como a reflexão, tenda a reduzir a luz solar no nível do solo, o aquecimento atmosférico aprimorado eventualmente aquece a superfície e neutraliza o resfriamento causado pela reflexão. Apesar de muitos anos de pesquisa ativa, os aerossóis ainda são a menos certa de todas as *forçantes climáticas* conhecidas. Isso dificulta a capacidade de separar os papéis dos aerossóis e dos gases de efeito estufa na condução das mudanças climáticas passadas, afetando as projeções confiáveis do clima futuro.

Albedo e outras causas

Imagens de satélite da Terra mostram que sua superfície é uma colcha de retalhos de muitas cores. Algumas são escuras, como o azul do oceano, o solo marrom e as florestas verdes. Outras cores são pálidas, como areias amarelas do deserto e gelo branco. Quando a luz do sol atinge superfícies de cores claras, grande parte dela é refletida, voltando para o espaço. Quando a luz do sol atinge superfícies de cor escura, muito pouco é refletido. A maior parte é absorvida.



Amostra das cores da Terra. As nuvens também contribuem para esse efeito. Imagem da NASA. (UCAR 2022)

A quantidade de energia refletida por uma superfície é chamada de *albedo*. As cores escuras têm um albedo próximo de zero, o que significa que pouca ou nenhuma energia é refletida. As cores pálidas têm um albedo próximo a 100%, o que significa que quase toda a energia é refletida. As florestas, por exemplo, têm um albedo de cerca de 15%, o que significa que 15% da luz solar que atinge uma floresta é refletida para o espaço. A neve fresca, por outro lado, pode ter um albedo de 90%, o que significa que 90% da luz solar que atinge um pico coberto de neve é refletida para o espaço.

O albedo ou refletância das nuvens (vapor d'água) aumenta com o número de partículas de aerossol que fornecem locais de nucleação para a formação de gotículas. O brilho resultante das nuvens as torna mais potentes para proteger a superfície da luz solar, causando o primeiro efeito indireto (ou efeito albedo da nuvem). Mais aerossóis também podem permitir que as nuvens durem mais, suprimindo as chuvas – o segundo efeito indireto, também chamado de efeito da vida útil das nuvens.

Se o clima da Terra é mais frio e há mais neve e gelo no planeta, o albedo aumenta, mais luz solar é refletida para o espaço e o clima fica ainda mais frio. Mas, quando o aquecimento causa o derretimento da neve e do gelo, superfícies de cores mais escuras são expostas, o albedo diminui, menos energia solar é refletida para o espaço e o planeta aquece ainda mais. Isso é conhecido como *feedback* gelo-albedo.

A quantidade refletida de volta para o espaço é chamada de albedo planetário. É calculado pela média do albedo de todas as superfícies da Terra – incluindo a terra, o oceano e o gelo. Acima da superfície da Terra, as nuvens refletem grande quantidade de luz solar para o espaço também. O albedo planetário da Terra é de cerca de 31%, o que significa que cerca de um terço da energia solar que chega à Terra é refletida para o espaço.

Outras causas, como erupções vulcânicas, mudanças na radiação solar e ciclos climáticos naturais (El Niño, por exemplo) podem mudar a temperatura do planeta, mas não na escala e velocidade que estão ocorrendo hoje por conta da interferência humana.

Forçantes radiativas

O aquecimento global é causado, dessa forma, por um maior acúmulo da energia provinda do Sol no sistema terrestre. Revendo um pouco de Física, a energia dividida pelo tempo representa a *potência* (medida em *Watt* e intuitivamente entendida como a energia que o Sol nos manda num instante muitíssimo breve). Essa “energia instantânea” também é distribuída pela área do planeta, o que nos leva a conceituar o que se chama de *fluxo radiativo* (expresso em Watt por metro quadrado ou W/m^2).

Como a atmosfera vai ficando mais densa (muito pouco, mas suficiente para “prender” o calor e evitar que este volte ao espaço), o fluxo radiativo se altera (entra mais energia do que sai numa determinada área e tempo). As causas dessa alteração de fluxo são chamadas de *forçantes radiativas (ou climáticas)*, os já conhecidos gases de efeito estufa, os aerossóis e o albedo.

Evidências e Efeitos, Incertezas

Dados climáticos robustos e confiáveis são o primeiro passo necessário à ciência do clima. As fontes e os tipos de dados observacionais empregados na ciência do clima são bastante variados. Os dados são coletados não apenas em estações terrestres, mas também em navios e bóias no oceano, em aviões, em satélites que orbitam a Terra, perfurando gelo antigo nos pólos terrestres, examinando anéis de árvores e sedimentos oceânicos e de outras maneiras. Muitos desafios surgem à medida que os cientistas tentam usar esses dados variados para responder a perguntas sobre o clima e suas mudanças. Esses desafios decorrem tanto do caráter dos dados - eles são irregulares no espaço e no tempo e são obtidos de instrumentos e outras fontes que têm vida útil limitada e variam em qualidade e resolução - quanto da natureza das questões que os cientistas do clima procuram abordar, que incluem questões sobre mudanças de longo prazo em escala global. Para tentar superar esses desafios, os cientistas do clima empregam uma rica coleção de práticas de modelagem de dados.

Dados baseados em estações meteorológicas começaram a surgir em meados do século XIX e expandiram-se rapidamente. Redes coordenadas de estações de observação terrestres medem temperatura próxima à superfície, pressão, precipitação, umidade e outras variáveis. Nas últimas décadas houve grandes esforços para reunir registros de observações de superfície passadas a fim de produzir conjuntos de dados globais de longo prazo que são úteis para pesquisas sobre mudanças climáticas. Esses esforços contínuos envolvem cooperação internacional, bem como atividades significativas de “resgate de dados”, incluindo geração de imagens e digitalização de registros em papel, em alguns casos com a ajuda do público.

Incertezas decorrem do estado de conhecimento incompleto que pode resultar da falta de informação ou do desacordo sobre o que é conhecido ou mesmo entendido (cognoscível). Pode ter vários tipos de fontes, desde imprecisão nos dados até ambiguidade de conceitos ou terminologia definidos, compreensão incompleta de processos críticos ou projeções incertas de comportamento humano. A incerteza pode, portanto, ser representada por medidas quantitativas (por exemplo, uma probabilidade função de densidade) ou por declarações qualitativas (por exemplo, refletindo o julgamento de uma equipe de especialistas). Registros de várias fontes precisam ser verificados, conciliados e homogeneizados para evitar erros e reduzir incertezas. Adicionam-se às pesquisas dados vindos de estações de monitoramento, radiossondas (em bóias, balões e outros), reconstruções paleoclimáticas (em fósseis, rochas, gelo, corais, anéis de árvores, sedimentos e outras fontes). A *reanálise* atmosférica é um esquema único de assimilação consistente de dados meteorológicos históricos e climáticos que abrangem um período prolongado, como se fosse um quebra-cabeça com peças faltantes e redundantes.

Modelos, Cenários, Linhas de Base e Limites

Modelos climáticos são simulações estruturadas - utilizadas para caracterizar elementos do sistema terrestre, para buscar explicações e aumentar a compreensão, para aprimorar sistemas anteriores e para estabelecer melhores projeções (um certo tipo de previsão).

A ciência do clima adota modelos que podem ser simples (balanços energéticos e de carbono, por exemplo), intermediários (representações da atmosfera, dos oceanos, geleiras, ciclos biológicos como os da fotossíntese) e complexos (circulação geral atmosfera-oceanos, sistemas terrestres integrados, modelos regionais de maior definição). Hoje, modelos de computador complexos que representam uma ampla gama de processos do sistema climático são um dos pilares da pesquisa na área. A computação tornou possível simular os movimentos em larga escala da atmosfera e dos oceanos usando complexas equações. Dinâmicas de fluidos são movimentos que transportam massa, calor, umidade e outras quantidades que moldam variáveis climáticas como temperatura média da superfície e precipitação pluviométrica (chuvas).

Cenários integrados de mudanças climáticas e socioeconomia são projeções de futuras emissões de gases de efeito estufa e seus efeitos associados, usadas por analistas para avaliar a vulnerabilidade futura às mudanças climáticas. Cenários e caminhos (sequências de “fotografias” de situações) são criados por cientistas para explorar opções de longo prazo, avaliar os impactos derivados e com isso entender a eficácia das ações propostas. Cenários e outras projeções se baseiam em premissas, como estimativas de níveis populacionais futuros, atividade econômica, estrutura de governança, valores sociais e padrões de mudança tecnológica. Cenários podem ser internacionais, regionais, nacionais e até locais. Através da comparação entre cenários (de referência e alternativos) busca-se auxiliar o processo de tomada de decisão para a mitigação ou adaptação às mudanças climáticas, bem como o estabelecimento de metas e prazos para sua implementação.

Algumas dessas metas estão relacionadas a limites físicos. É o caso do aumento médio da temperatura em não mais do que 2 graus Celsius (2°C), com a ambição de mantê-la em até 1,5°C relativos aos níveis pré-industriais. Em geral se toma por base o ano de 1850, quando por convenção teria se iniciado a *Revolução Industrial*, considerada ponto de partida para a significativa interferência humana no sistema climático global. Esses e outros *limites* estão associados à *capacidade de suporte do meio ambiente* – ou condição de regeneração dos sistemas naturais. Há vários desses limites e muitos já foram ultrapassados e se tornaram irreversíveis - caso por exemplo da perda de biodiversidade e do degelo das calotas polares. Outros estão próximos de acontecer - caso da savanização da Floresta Amazônica, afetando o ciclo da água. Todos demandam ações drásticas, ambiciosas e imediatas, chamadas de *transformações*, em oposição a *transições* e outros processos mais lentos e paulatinos, estes incompatíveis com o estado de *emergência (ou urgência) climática* definido pelas metas e evidências científicas.

Ao se falar em cenários é preciso entender o conceito das narrativas que os antecedem. *Narrativas* são enredos que buscam dar sentido a uma situação ou uma série de eventos através da construção de um conjunto de elementos. Geralmente são construídas sobre raciocínio lógico ou causal. Na pesquisa de clima, o termo é usado tanto em relação a cenários quanto a uma trajetória futura dos sistemas humanos ou climáticos, ou a um determinado evento situado no futuro. Nesse contexto, os enredos podem ser usados para descrever possibilidades plurais, futuros condicionais ou mesmo explicações para uma situação atual, em contraste com explicações únicas e definitivas.

Cenários são, assim, descrições plausíveis de como o futuro pode se desenrolar com base em um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre as principais diretrizes ou premissas escolhidas (por exemplo, mudanças tecnológicas, de preços e custos, demográficas e macroeconômicas) e seus relacionamentos (equações, também chamadas de identidades). Cenários podem ser:

- de *emissões de gases de efeito estufa ou aerossóis*, com base em um conjunto coerente e internamente consistente de suposições sobre diretrizes (forças motrizes, premissas como desenvolvimento demográfico e socioeconômico, mudança tecnológica, energia e uso da terra) e suas principais relações;
- de *concentração desses gases e aerossóis*, derivados de cenários de emissões, frequentemente usados como entrada para modelos climáticos;
- de impactos, como a alteração no albedo, aumento da temperatura, elevação no nível do mar, alterações nas precipitações e outros
- cenários mais abrangentes, como os de pressão-estado-resposta (e seus sucedâneos, como o forçantes-pressão-estados-impactos-respostas).

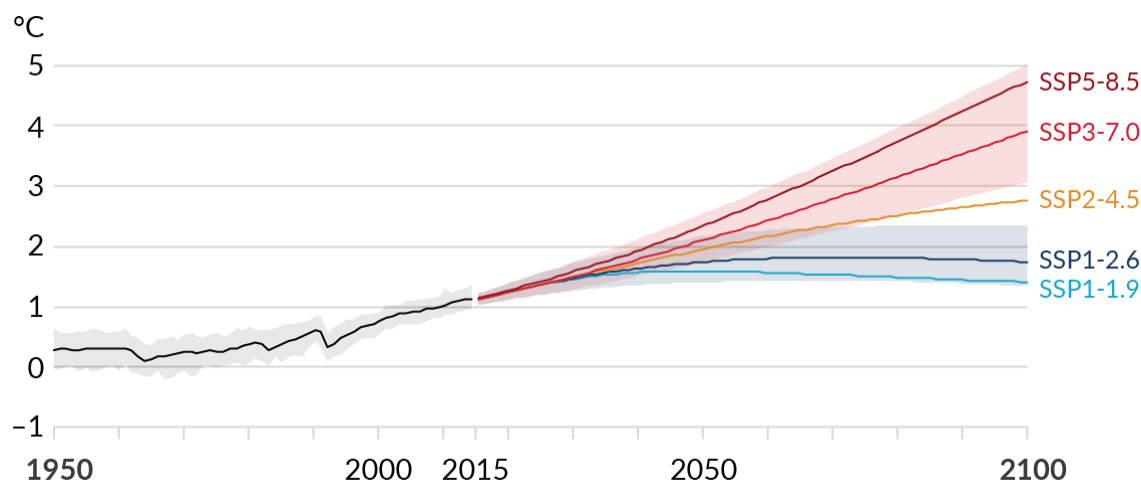
Cenários não são previsões, mas visões das potenciais consequências de um conjunto de ações. Um exemplo extremamente simplificado seria: “com o aumento da população e melhora da atividade econômica as emissões aumentam, com isso a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera aumentam, com isso a temperatura média do planeta aumenta”. Outro cenário contrastante diria que

“se aumentarmos a eficiência tecnológica as emissões podem não crescer, ou até diminuir, mantendo o padrão de vida da população”. Tem-se assim:

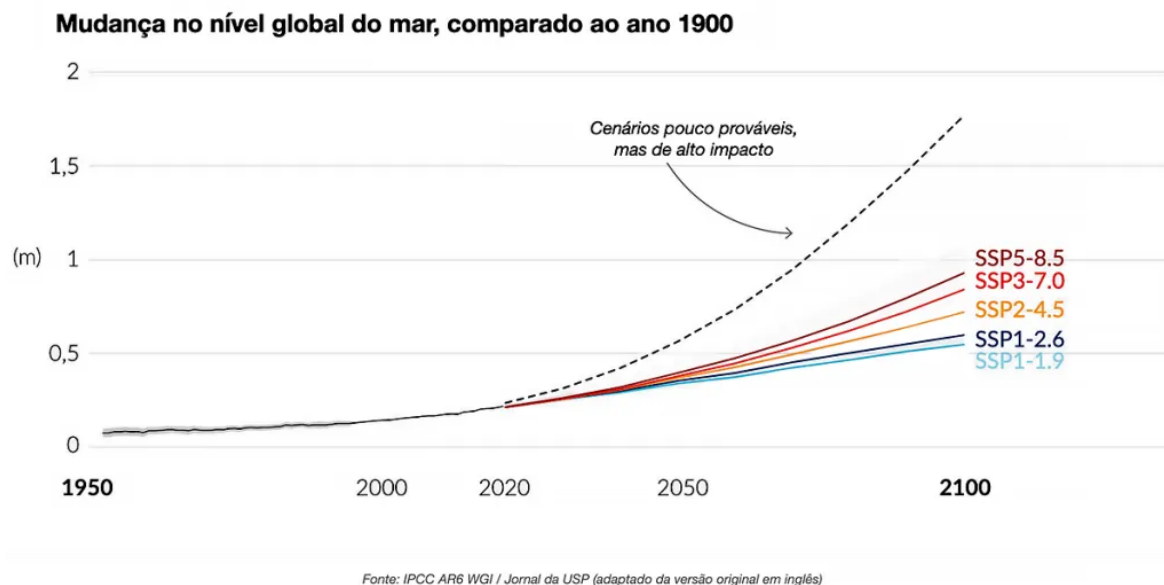
- Um ponto de partida para comparação, o primeiro dos cenários acima pode ser chamado de *Referência ou de Linha de Base* (que pode supor padrões de desenvolvimento socioeconômico e/ou futuros que quase não alteram políticas atualmente em curso; até pouco tempo atrás esse cenário era chamado de “negócios usuais” - do inglês *business-as-usual* ou *BAU*).
- Um ou mais cenários alternativos, que podem por sua vez ser
 - cenários históricos contrafactuais, assumindo premissas que não ocorreram (“e se o passado tivesse sido assim?”, como a inexistência de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa ou mesmo nenhuma mudança climática);
 - cenários socioeconômico, descrevendo um futuro possível em termos de população, produto interno bruto (PIB), uso de energia, produção agrícola e outros análogos;
 - cenários ambientais, como os de uso e cobertura do solo

Cenários integrados são chamados de modelos de avaliação integrada (em inglês *IAMs*). Esses contêm regra geral trajetórias, ou caminhos representativos. O termo *Trajetória* enfatiza o fato de que não são de interesse apenas os resultados de longo prazo, mas também o caminho tomado ao longo do tempo para os alcançar.

As trajetórias mais frequentemente encontradas na ciência do clima são as chamadas *trajetórias representativas*. Até 2021 elas eram expressas em termos de concentração de gases de efeito estufa (em inglês, sob a sigla *RCPs*). O Sexto Relatório de Avaliação do IPCC, cujos volumes foram publicados neste ano e no seguinte, adotaram uma nova notação: os chamados *caminhos socioeconômicos compartilhados* (em inglês *SSPs*), associados a vias de desenvolvimento integrado. A estrutura integrativa SSP-RCP é agora amplamente utilizada na análise de impacto climático e opções de políticas na área de clima.



Aumento médio na temperatura (relativo a 1850-1900) conforme os 5 cenários SSP (IPCC, 2021).



Elevação do nível do mar tendo por base o ano 1900 (Escobar e Magalhães, 2021, baseado em IPCC 2021)

Não há limites seguros para o aquecimento global. O objetivo final da Convenção do Clima da ONU de 1992 (em inglês *UNFCCC*, reconhecida no Brasil pelo Decreto Federal 2.652 de 01.07.1998) é o de

alcançar (...) a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado num prazo suficiente que permita aos ecossistemas adaptarem-se naturalmente à mudança do clima que assegure que a produção de alimentos não seja ameaçada e que permita ao desenvolvimento econômico prosseguir de maneira sustentável (art 2º da Convenção).

O texto vale para também para todos os documentos adotados pelas *Conferência das Partes* (também chamadas de *CoP*) da Convenção do Clima. Como relatado, na CoP21 em 2015 foi negociado e aprovado no Acordo de Paris o teto de 2 graus Celsius (2 °C) acima do observado há cerca de 170 anos, antes da Revolução Industrial. O Acordo ainda prevê a ambição de manter os níveis em 1,5 °C ou menos - algo fundamental para proteger regiões mais vulneráveis como pequenas ilhas. Modelos científicos apontam que para que isso seja obtido é preciso que seja atingida o quanto antes, em escala global, a *neutralidade climática*, ou seja, *emissões (antropogênicas líquidas) zero* de gases de efeito estufa (em inglês *net zero*).

Esse ponto será retomado mais adiante.

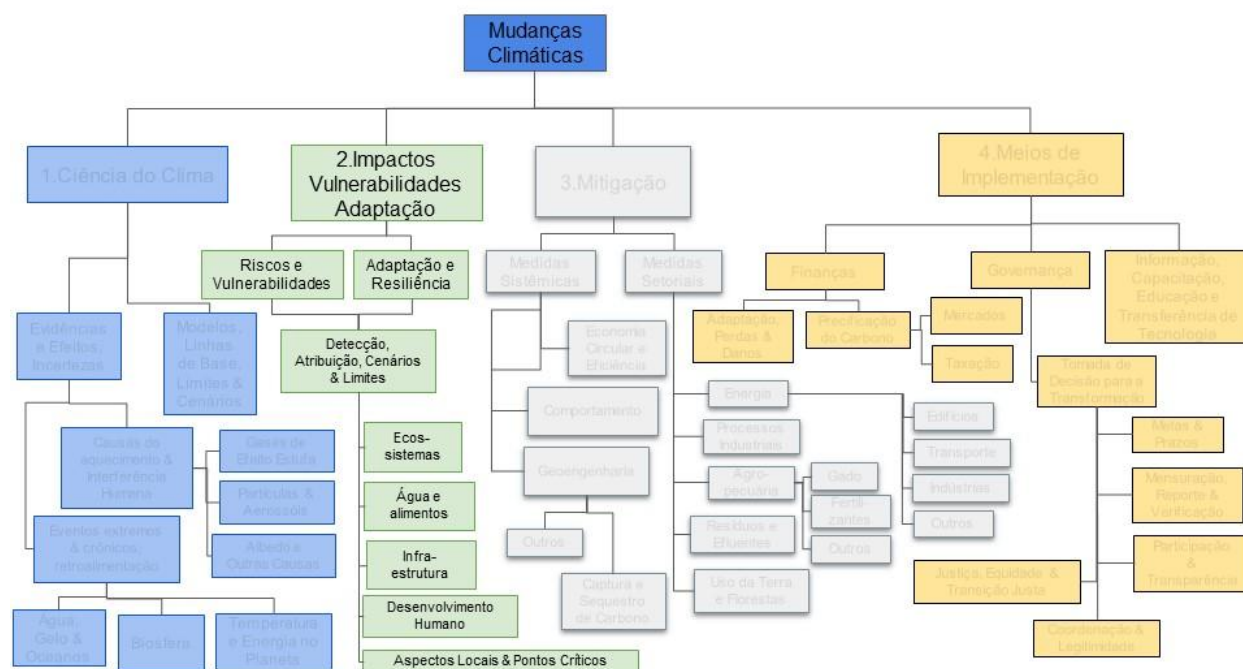
Um exercício simples

Climatologia não é algo que se observa num curto intervalo de tempo. Ainda assim, professores podem propor que os estudantes entrevistem pessoas mais idosas, especialmente aquelas mais ligadas à sua terra de origem, perguntando sobre como era o clima antigamente e como é hoje. As respostas serão simples, podendo estar associadas ao microclima, ou até ao aquecimento global - a distinção não é tão importante nesse momento. A pesquisa pode também envolver a literatura, as artes plásticas ou outras manifestações culturais. Como exemplo temos a canção “São Paulo da Garoa” de Tonico e Tinoco, da década de 1940. Pode-se pesquisar também na Internet por quadros de cenas que não existem mais.



Baía de Uri, Brunnen, Suíça 1870. Pintura de John Singer Sargent (1856–1925), The MET Museum (Creative Commons CC BY 4.0, rawpixel.com)

Parte 2. Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação



Sistematização parte 2, Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação, com temas associados (elaboração própria).

Após o entendimento das questões climatológicas, passa-se ao dos impactos da mudança do clima nos seres humanos, ecossistemas e infraestrutura. Medidas adaptativas buscam um estado de resiliência, ou seja, de adequação sustentável às novas realidades.

Impactos

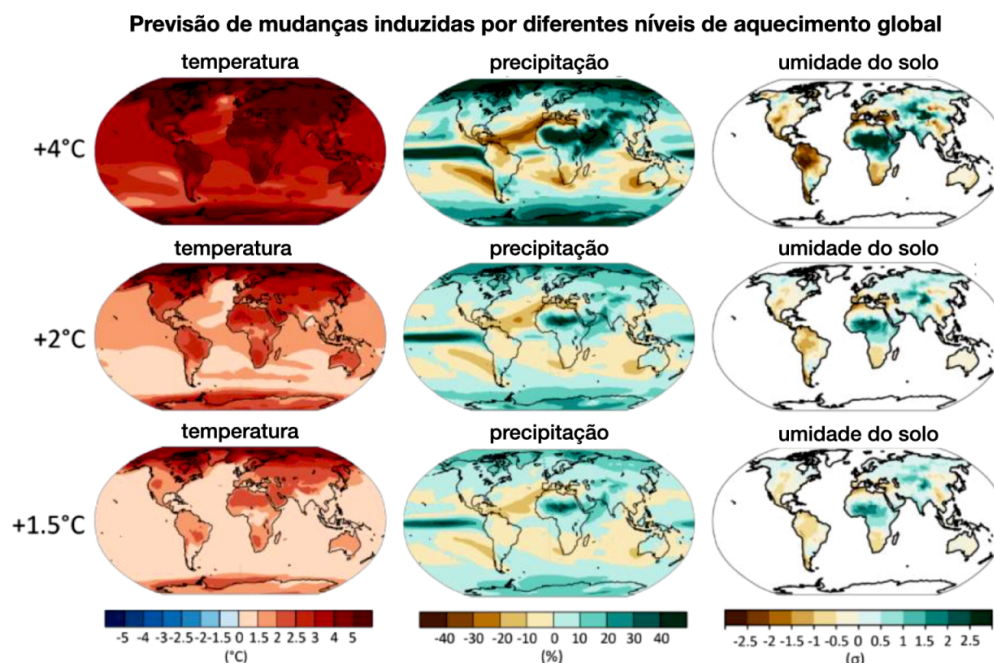
As interações entre a vida e o clima são complexas. A biosfera influencia e é influenciada pelo clima, sendo o ciclo do carbono parte integrante dos processos biológicos, geológicos e climáticos. Muitos organismos dependem de faixas específicas de temperatura, precipitação, umidade e luz solar para sobreviver. Quando expostos a condições climáticas fora dessas faixas, buscam se adaptar ou migrar, sob o risco de perecer. As mudanças nas condições climáticas podem levar a condições além dessas faixas, afetando a saúde e o funcionamento dos ecossistemas, consequentemente a sobrevivência de espécies inteiras. Isso já ocorreu há milhões de anos, como apontam os padrões de distribuição de fósseis extintos.

Registros naturais mostram que os últimos 10.000 anos foram um período incomumente estável na história climática da Terra - exatamente quando as sociedades humanas modernas se desenvolveram. Com elas

vieram os sistemas agrícolas, econômicos e de transporte dos quais dependemos. Estes, por sua vez, são vulneráveis se o clima mudar significativamente.

Impactos climáticos referem-se às consequências dos riscos da mudança climática nos sistemas naturais e humanos. Impactos geralmente se referem a efeitos sobre vidas, meios de subsistência, saúde e bem-estar, ecossistemas e espécies, economia, bens sociais e culturais, serviços (incluindo serviços ecossistêmicos) e infraestrutura. Os impactos podem ser referidos como consequências ou resultados, e podem ser adversos ou benéficos.

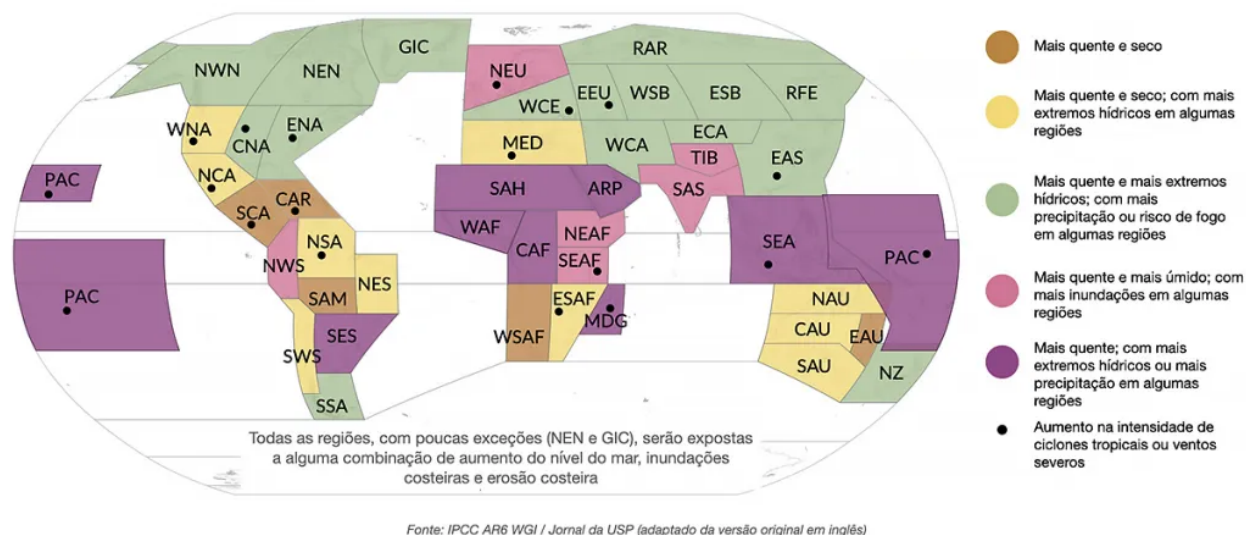
Os impactos de um clima em aquecimento incluem o aumento do nível do mar, a diminuição da disponibilidade de recursos de água doce, o aumento do clima extremo, a acidificação dos oceanos, a perturbação dos ecossistemas e os efeitos na saúde humana e na agricultura.



Fonte: IPCC AR6 WGII / Jornal da USP (adaptado da versão original em inglês)

Alterações em temperatura, precipitação e umidade do solo conforme cenários (Escobar e Magalhães, 2021, tradução literal de IPCC 2021)

Mudanças esperadas por região num cenário de 2 °C de aquecimento



Alterações regionais (Escobar e Magalhães, 2021, tradução literal de IPCC 2021)

O derretimento das camadas de gelo e geleiras, combinado com a expansão térmica da água do mar à medida que os oceanos aquecem, está causando o aumento do nível do mar. A consequência é a inundação das áreas mais baixas, contaminando as fontes costeiras de água doce e submergindo gradualmente as instalações costeiras, as barreiras e até ilhas inteiras. A elevação do nível do mar aumenta o risco de danos a casas e edifícios causados por tempestades, como as que acompanham os furacões.

Eventos climáticos extremos aumentam em frequência e intensidade como resultado das alterações climáticas. Muitos locais serão atingidos por secas, ondas de calor e frio intensos, chuvas e ventos fortes.

Também está se alterando a distribuição global dos recursos de água doce, por conta da mudança dos padrões de precipitação e das condições de temperatura. Isso reduz o acesso confiável à água para comunidades, agricultura e indústrias. O acúmulo de neve no inverno e as geleiras de montanha que fornecem água para uso humano também estão diminuindo como resultado do aquecimento global.

A química da água do oceano é alterada pela absorção de dióxido de carbono da atmosfera, fazendo com que a água se torne mais ácida, ameaçando a sobrevivência de espécies marinhas construtoras de conchas e toda a cadeia alimentar da qual fazem parte, incluindo cerca de 2 bilhões de seres humanos que dependem de proteína marinha..

Os ecossistemas terrestres e oceânicos serão ainda mais perturbados pelas alterações climáticas, forçando seres vivos a migrar para novas áreas com condições climáticas favoráveis. Estes incluem vetores de doenças, bactérias e vírus, causando mais doenças infecciosas e afetando a saúde humana em locais onde isso antes pouco ocorria.

Os rendimentos das colheitas reduzidos pela seca, a degradação da qualidade do ar e da água e o aumento dos riscos nas áreas costeiras e baixas contribuirão para condições insalubres, particularmente para as populações mais vulneráveis.

Vulnerabilidades

Vulnerabilidade é a propensão ou predisposição de um sistema humano ou natural a ser adversamente afetado pelos impactos climáticos. A vulnerabilidade abrange uma variedade de conceitos e elementos incluindo sensibilidade ou suscetibilidade a danos e falta de capacidade para lidar e se adaptar.

Exposição é a presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções, serviços e recursos ambientais, infraestrutura ou bens econômicos, sociais ou culturais, em lugares e configurações que podem ser adversamente afetados à mudança do clima. *Riscos climáticos*, por sua vez, resultam das interações de perigos relacionados ao clima (incluindo eventos climáticos extremos), exposição e vulnerabilidade.

Adaptação e Resiliência

A *Adaptação* se refere a ajustes em sistemas naturais (ecológicos, processo de ajuste à realidade do clima e seus efeitos) ou sócio-econômicos (humanos, resultantes de práticas, processos, medidas ou mudanças estruturais) em resposta às mudanças climáticas correntes ou projetadas. Nos sistemas humanos a Adaptação pode ser antecipada ou proativa (aquela que ocorre antes de serem observados os impactos) ou reativa (posterior à ocorrência dos impactos, em geral com piores consequências). Pode ser privada (pelos indivíduos, famílias, ou companhias privadas) ou pública (pelos governos). Pode ser *autônoma ou espontânea*, decorrente de mudanças ecológicas em sistemas naturais e por mudanças no mercado ou bem-estar em sistemas humanos. Pode ser *planejada*, resultante de uma decisão (política ou não) deliberada, baseada na consciência da necessidade de mudanças. Vários outros termos podem ser associados à Adaptação:

- *déficit* ou lacuna (o que falta para se adaptar adequadamente),
- *limites* (até onde ainda é possível se adaptar),
- *necessidades* (níveis mínimos adequados de adaptação) ou *opções* (espectro de medidas e estratégias possíveis),
- *incrementos e transições* (passos que mantêm a essência e integridade de um sistema numa dada escala) e *transformações* (mudanças nos atributos fundamentais de um sistema social e ecológico antecipando os impactos)
- baseada em *comunidades* (foco no empoderamento e promoção das capacidades locais) e/ou baseada na *natureza* (soluções ecossistêmicas)
- *evolucionária* (no qual uma espécie ou população se modifica hereditariamente para se adequar - algo diferente de aclimação)

- com efeitos colaterais positivos (*sinergias*) e negativos (*antagonismos*, inclusive a chamada *má-adaptação*).

Resiliência, por sua vez, é a capacidade dos sistemas sociais, econômicos e ecológicos interconectados para lidar com um evento perigoso, tendência ou perturbação, respondendo ou se reorganizando de forma a manter sua função essencial, identidade e estrutura. A resiliência é um atributo positivo quando mantém a capacidade de adaptação, aprendizagem e/ou transformação.

Detecção e Atribuição

A *detecção* de mudança é definida como o processo de demonstrar que o clima ou um sistema afetado pelo clima se alterou em algum sentido estatístico definido, sem necessariamente fornecer uma razão para essa mudança. Uma mudança identificada é detectada em observações se sua probabilidade de ocorrência por acaso, devido apenas à variabilidade interna, for considerada pequena (por exemplo, menos de 10%).

A *atribuição* é definida como o processo de avaliar as contribuições relativas de múltiplos fatores causais para uma mudança ou evento dentro de uma margem de confiança. Cenários de referência de pesquisa de atribuição de impacto podem se referir a situações *contrafactuais*, nas quais hipoteticamente não teriam ocorrido emissões antropogênicas de gases de efeito estufa (contrafactuais históricos), ou nenhuma mudança climática (contrafactuais de impacto).

Cenários

Cenários já foram abordados anteriormente, mas neste Capítulo eles podem se referir a impactos, como situações em que os efeitos das mudanças climáticas afetam os sistemas vivos e a infraestrutura.

Cenários de referência apresentam os impactos que podem ocorrer caso nada seja feito (ou as políticas em curso permaneçam inalteradas). Em contraposição há cenários alternativos e suas correspondentes trajetórias. Uma delas são os chamados *Caminhos de Desenvolvimento Sustentável* (em inglês *SDPs*), trajetórias para atingir os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável* (*ODS* ou em inglês *SDGs*) da ONU no curto prazo e as metas de desenvolvimento sustentável a longo prazo. No contexto das mudanças climáticas, esses caminhos denotam trajetórias que abordam dimensões sociais, ambientais e econômicas de desenvolvimento, adaptação e mitigação, e transformação, em um sentido genérico ou sob uma dada perspectiva metodológica, como modelos de avaliação integrados e simulações de cenários.

Limites da adaptação

A mudança no clima deve ocorrer em dimensões onde a adaptação é incapaz de evitar impactos prejudiciais e riscos adicionais. *Limites de adaptação* se referem a espaços de solução, isto é, o conjunto de dimensões biofísicas, culturais, socioeconômicas e político-institucionais dentro das quais as oportunidades e restrições determinam por que, como, quando e quem age para reduzir os riscos

climáticos. Dentro destas dimensões existem limites “rígidos” (insuperáveis, que ocorrem quando nenhuma adaptação adicional é possível) e limites “suaves” (superáveis, que ocorrem quando uma adaptação adicional pode ser possível se as restrições puderem ser superadas). Os limites do espaço de solução são dependentes dos caminhos escolhidos.

Recomendações para educadores

Frequentemente os temas relacionados a impactos e vulnerabilidades climáticas têm destaque nas discussões entre o grande público. Desastres naturais ocorridos recentemente se entremeiam com lançamentos de relatórios, palestras e grandes eventos de negociação (principalmente as CoP, que ocorrem por volta de novembro todos os anos). Também em aulas, volta e meia nos deparamos com imagens de ursos polares flutuando sobre pedaços de gelo, ou fotos do planeta Terra seguro por mãos. Essas opções têm seu valor, mas sua repetição traz uma sensação de impotência e consequente desinteresse na matéria.

Recomenda-se em especial muita cautela ao se transmitirem mensagens pessimistas a crianças e pré-adolescentes. A geração em fase adulta tem responsabilidade, tanto pelo que está ocorrendo quanto pelo que está sendo ensinado. Jovens em fase de decisão sobre suas carreiras precisam ter opções e esperanças.

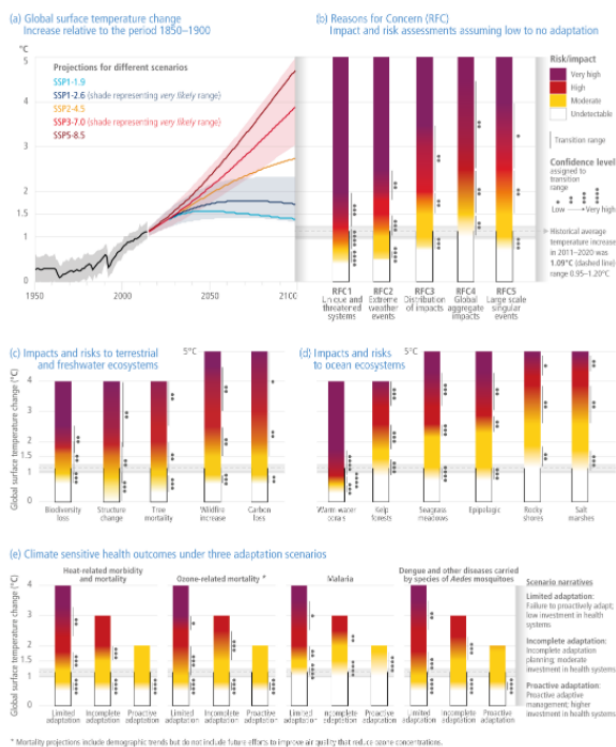
Esse ponto será retomado mais adiante.

Análise dos gráficos do IPCC AR6

Há muitas imagens e outros tipos de informações disponíveis sobre os impactos e vulnerabilidades climáticos. Reconhecendo a diversidade de públicos, aqui foi dada preferência a uma informação bastante consagrada: a figura do recente Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (2022), Grupo de Trabalho 2. Ela relaciona as trajetórias de emissão de gases de efeito estufa com os principais impactos, magnitudes, níveis de confiança e consequências das alternativas de adaptação. Para facilitar a compreensão, esta figura apresenta-se em seguida desmembrada, fielmente traduzida do original em inglês e devidamente comentada.

Os diagramas mostram a mudança nos níveis de impactos e riscos avaliados para o aquecimento global de 0 a 5°C, considerando ao longo do intervalo a mudança de temperatura da superfície global em relação ao período pré-industrial (1850-1900).

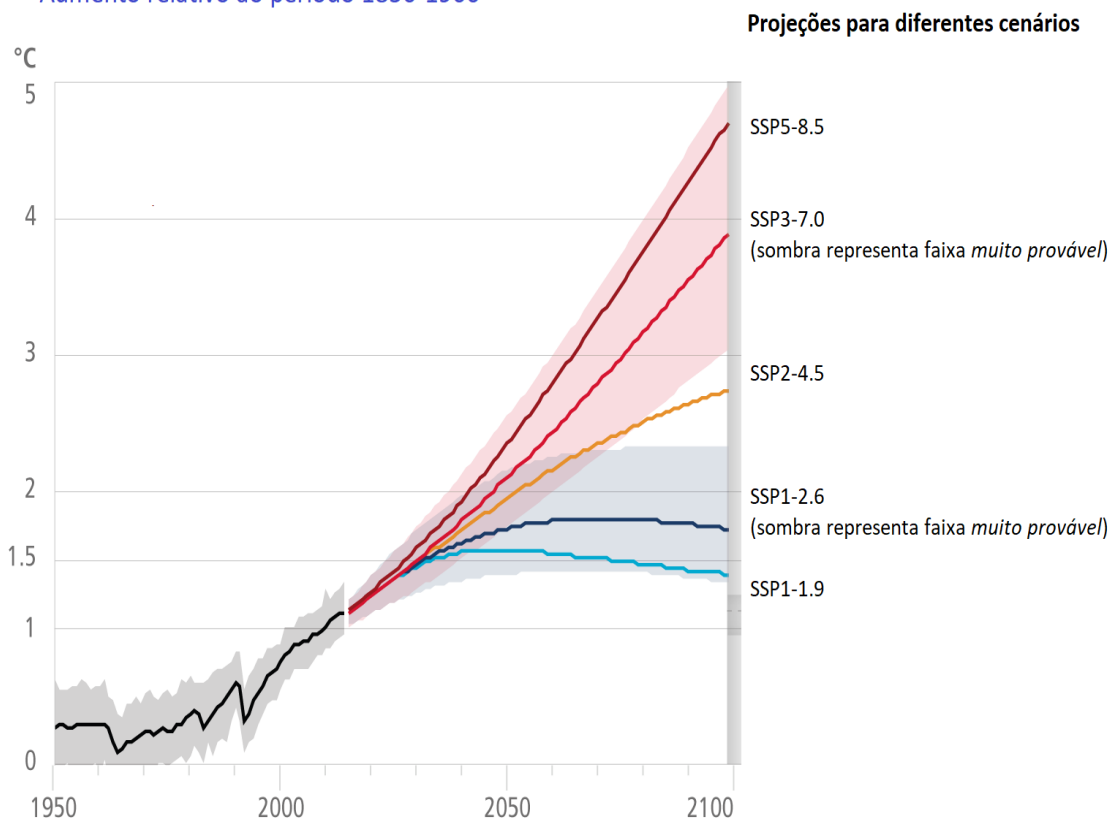
Global and regional risks for increasing levels of global warming



Visão geral impactos e vulnerabilidades no original em inglês do IPCC AR6 WG2 (IPCC, 2021): diagramas sintéticos de avaliações globais e setoriais e exemplos de riscos-chave regionais.

A análise parte dos cenários de emissão e os correspondentes aumentos na temperatura média superficial do globo terrestre - Parte (a) da figura acima. Os valores centrais são apresentados por meio de linhas e as suas faixas de variações destacadas em áreas coloridas. Há sempre uma incerteza, até nos dados históricos, por conta de uma ampla gama de fontes de literatura científica consultada. O primeiro gráfico mostra o aumento histórico até o ano 2016 (em cinza), comparado à linha de base, no caso a média do período entre os anos 1850 (Revolução Industrial) e 1900 (início do século XX, quando o consumo de combustíveis fósseis começou a se intensificar por conta das indústrias e do transporte). As projeções futuras são os cinco cenários SSP, caminhos socioeconômicos compartilhados, do menos para o mais impactante. Vale lembrar os objetivos de 1,5°C - 2°C do Acordo de Paris de 2015 da ONU, acima dos quais os níveis de riscos climáticos são considerados muito altos e, portanto, intoleráveis dentro das negociações.

(a) Mudança na temperatura da superfície global
Aumento relativo ao período 1850-1900



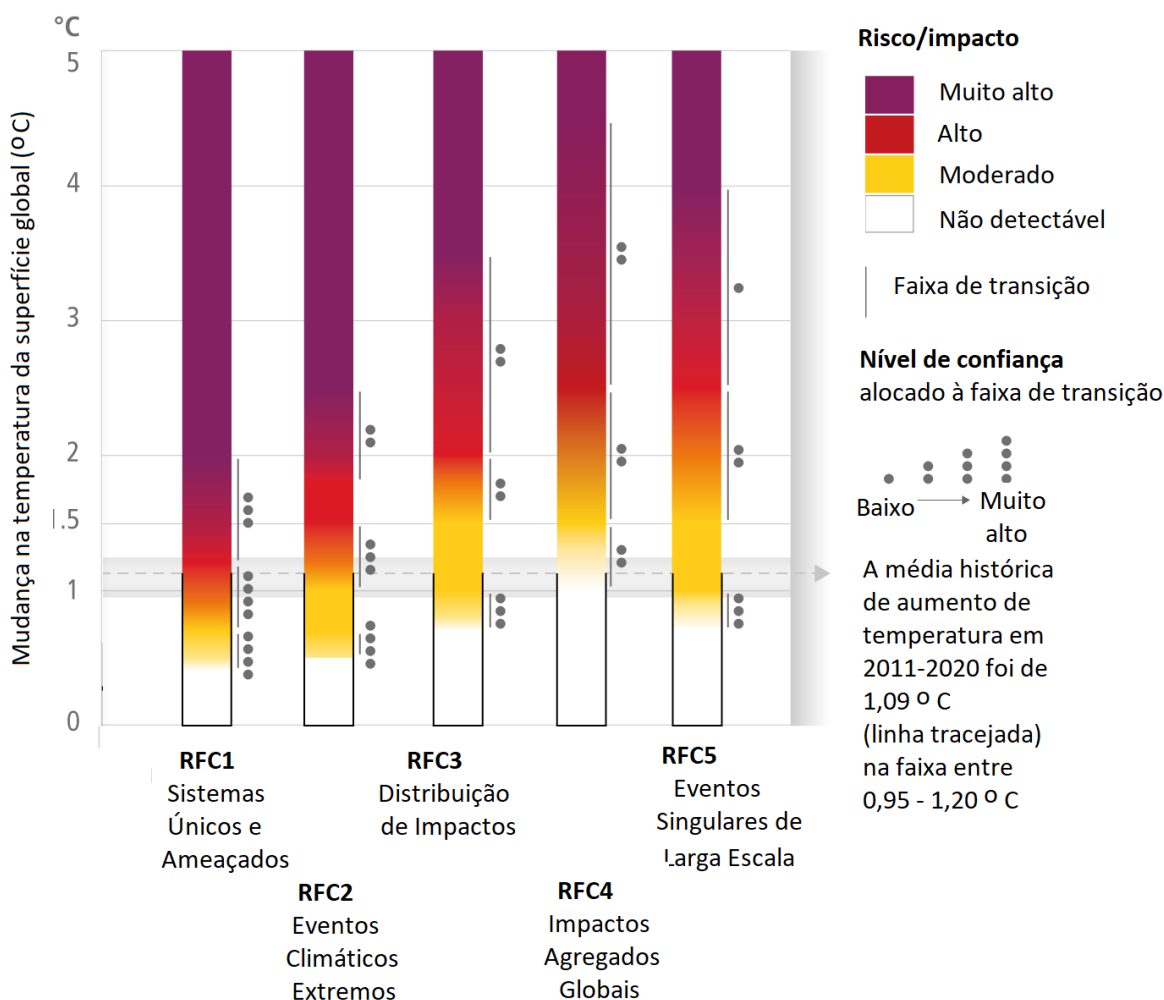
Detalhe do gráfico de impactos e vulnerabilidades: aumentos da temperatura média global nos 5 cenários do IPCC AR6 WG2 (2022, tradução literal de própria elaboração)

A figura a seguir - parte (b) da principal) é aparentemente complexa mas transmite muita informação útil. Partindo-se das legendas, a atribuição de risco e impacto segue um esquema de cores que lembra brasas queimando, partindo de níveis não detectáveis (em branco) até aqueles considerados muito altos (em roxo bem escuro). A fronteira entre os níveis amarelo e vermelho é particularmente importante e pode servir de referência para diversas tomadas de decisão em políticas públicas, tanto para a Adaptação quanto para a Mitigação.

Ainda na legenda lateral, os pequenos pontos laterais indicam quatro níveis de confiança que os autores-cientistas do IPCC atribuem a essas constatações. Quanto maior o número de pontos, mais forte a evidência e portanto menor a incerteza.

(b) Razões para Preocupação

Avaliações de Impactos e Riscos assumindo baixa ou nenhuma adaptação



Detalhe do gráfico de impactos e vulnerabilidades: razões para preocupação conforme IPCC AR6 WG2 (2022, tradução literal de própria elaboração)

As diversas Razões para Preocupação (em inglês *RFC*) comunicam a compreensão científica sobre o acúmulo de risco para cinco categorias amplas. Os diagramas são mostrados para cada RFC, assumindo que a adaptação é fragmentada, localizada e compreende ajustes incrementais às práticas existentes. No entanto, a transição para um nível de risco muito alto tem ênfase na irreversibilidade e nos limites de adaptação. O nível de risco indetectável (em branco) indica que nenhum impacto associado é detectável e atribuível às mudanças climáticas; o risco moderado (em amarelo) indica que os impactos associados são detectáveis e atribuíveis às mudanças climáticas com pelo menos confiança média, também levando em conta os outros critérios específicos para os principais riscos; o alto risco (em vermelho) indica impactos severos e generalizados que são considerados altos em um ou mais critérios para avaliar os principais riscos; e nível muito alto (roxo) indica risco muito alto de impactos graves e a presença de

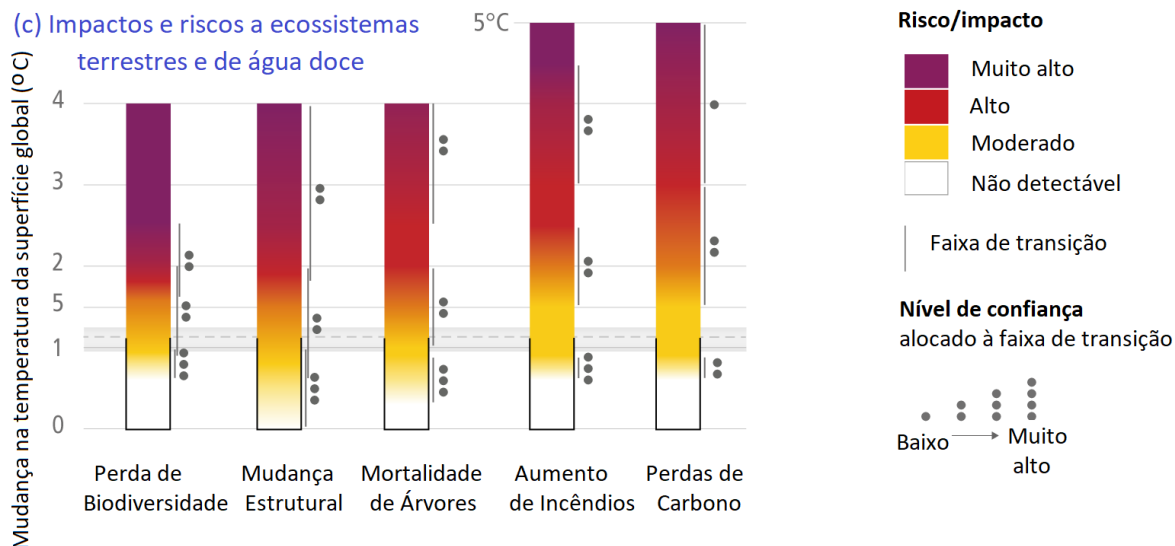
irreversibilidade significativa ou persistência de perigos relacionados ao clima, combinado com capacidade limitada de adaptação devido à natureza do perigo ou impactos e riscos. A linha horizontal aponta o aquecimento global atual de 1,09°C, que é usado para separar os impactos observados e passados abaixo da linha dos riscos futuros projetados acima dela.

As Razões para Preocupação são as seguintes:

- As RFC1 se referem a Sistemas Únicos e Ameaçados: sistemas ecológicos e humanos que possuem áreas geográficas restritas, limitadas por condições relacionadas ao clima e alto *endemismo* (desenvolvimento numa dada região) ou outras propriedades distintas. Exemplos incluem recifes de coral, o Ártico e seus povos indígenas, geleiras de montanha e pontos críticos (*hotspots*) de biodiversidade.
- As RFC2 são os Eventos climáticos extremos: riscos e impactos para a saúde humana, meios de subsistência, ativos e ecossistemas de eventos climáticos extremos, como ondas de calor, chuva forte, seca e incêndios florestais associados e inundações costeiras.
- As RFC3 são relativas à Distribuição de impactos: riscos e impactos que afetam desproporcionalmente determinados grupos devido à distribuição desigual de perigos físicos de mudança climática, exposição ou vulnerabilidade.
- As RFC4 são os Impactos agregados globais: impactos em sistemas socioecológicos que podem ser agregados globalmente em uma única métrica, como danos monetários, vidas afetadas, espécies perdidas ou degradação de ecossistemas em escala global.
- As RFC5, por sua vez, são Eventos singulares de grande escala: mudanças relativamente grandes, abruptas e às vezes irreversíveis nos sistemas causadas pelo aquecimento global, como a *desintegração* do manto de gelo ou a desaceleração da circulação *termohalina* (oceânica global movida pelas diferenças de densidade entre as massas de água, causadas por pequenas variações na temperatura ou na salinidade da água). São as grandes rupturas.

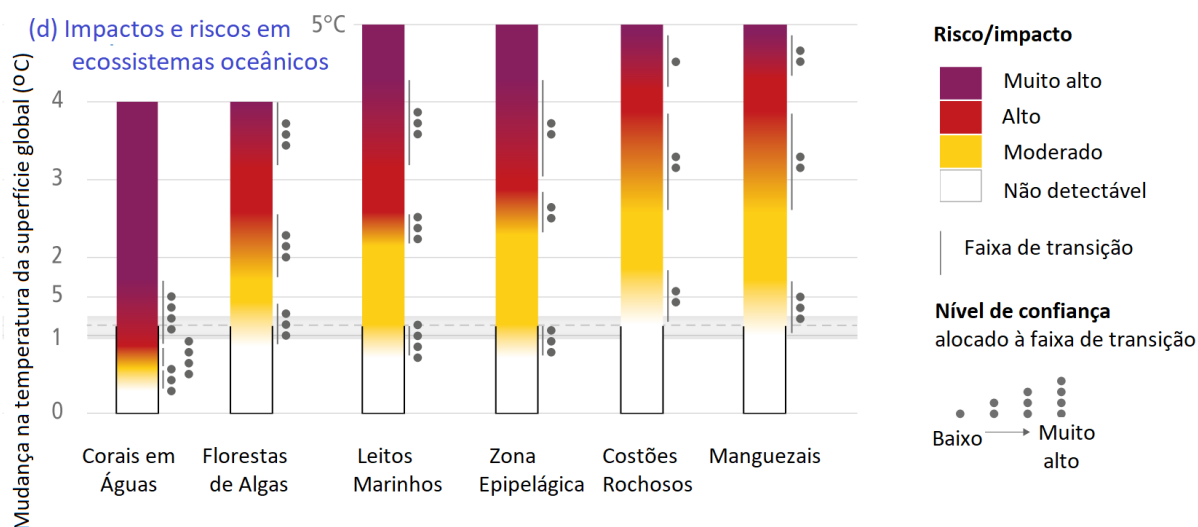
A parte que se segue aponta os riscos para os ecossistemas, assumindo pouca ou nenhuma adaptação. A transição para um nível de risco muito alto tem ênfase na irreversibilidade e nos limites de adaptação. Em ecossistemas terrestres e de água doce (c), um exemplo de mudança estrutural ecossistêmica é a chamada *savanização* das florestas tropicais, onde um bioma é substituído por outro. Isso está acontecendo nas bordas da Floresta Amazônica. Perdas de carbono se referem a diminuições por erosão

ou por reações químicas de oxidação da biomassa que antes estocava esse elemento e passou a lançá-lo na atmosfera.



Detalhe do gráfico de impactos e vulnerabilidades: impactos e riscos a ecossistemas terrestres e de água doce conforme IPCC AR6 WG2 (2022, tradução literal de própria elaboração).

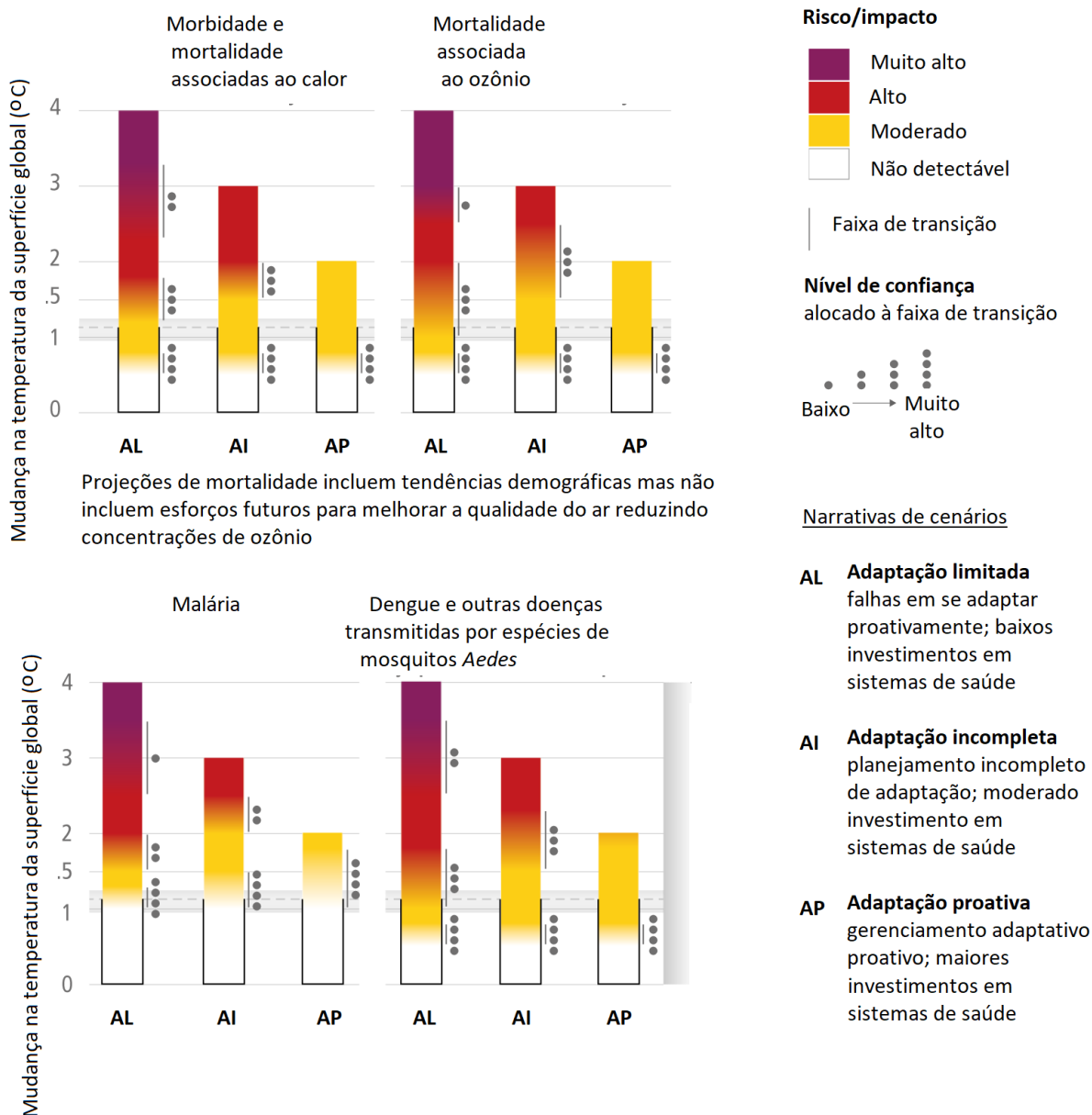
Nos sistemas marinhos (d), temos o branqueamento e a morte dos recifes de coral pela acidificação dos oceanos (por conta de mais CO₂ dissolvido na água), a redução nas algas e da vida nos leitos do mar, as alterações em zonas epipelágicas (até 200 metros de profundidade, onde ocorre a fotossíntese e vive a maior parte dos seres vivos) e nos manguezais e demais sistemas estuarinos.



Detalhe do gráfico de impactos e vulnerabilidades: impactos e riscos a ecossistemas oceânicos, conforme IPCC AR6 WG2 (2022, tradução literal de própria elaboração).

O detalhe seguinte (e) mostra resultados de saúde humana sensíveis ao clima em três cenários de eficácia da adaptação (limitada ou AL, incompleta ou AI, proativa ou AP),, com projeções baseadas em vários cenários e, em alguns casos, tendências demográficas.

(e) Resultados climaticamente sensíveis sob três cenários de adaptação

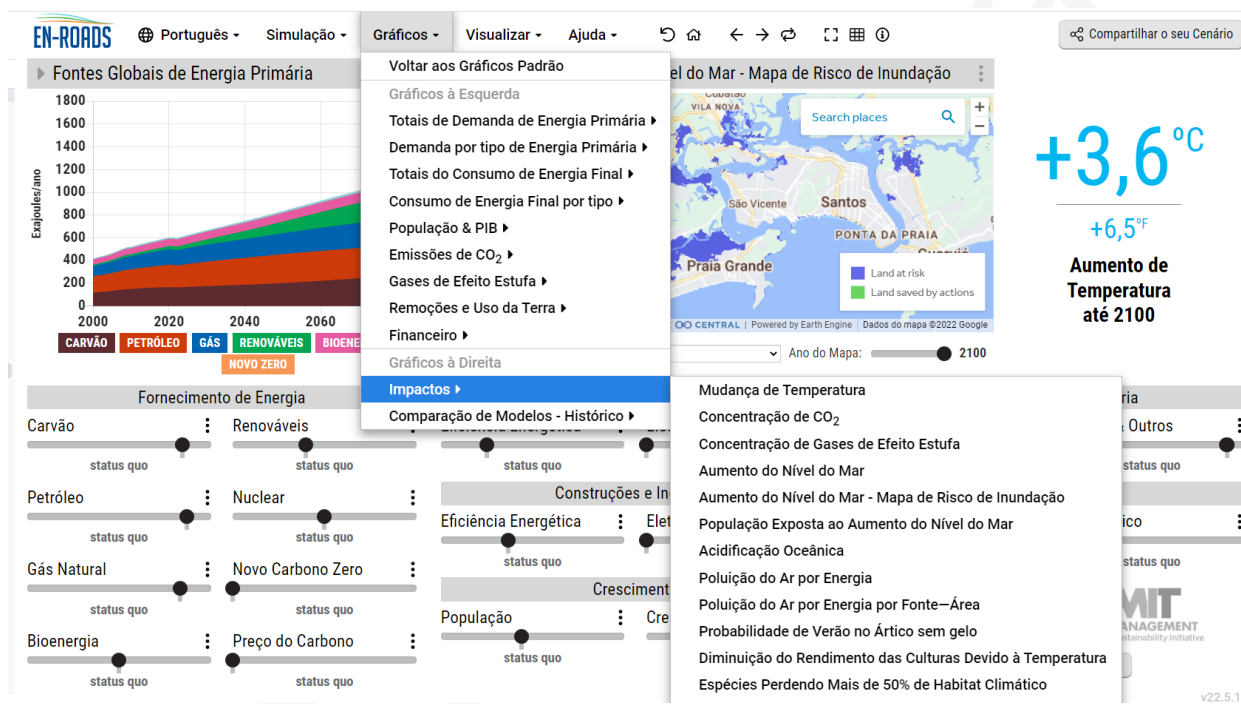


Nas Américas do Sul e Central, os riscos mais evidentes são a segurança hídrica, doenças transmissíveis, perdas em ecossistemas, secas afetando a segurança alimentar, e danos à vida e infraestrutura (edifícios, transporte e outros) devido a enchentes, deslizamentos de terra, aumento do nível do mar, tempestades e erosão costeira.

Um exercício simples

A melhor forma de se conscientizar sobre os impactos climáticos é a *observação*.

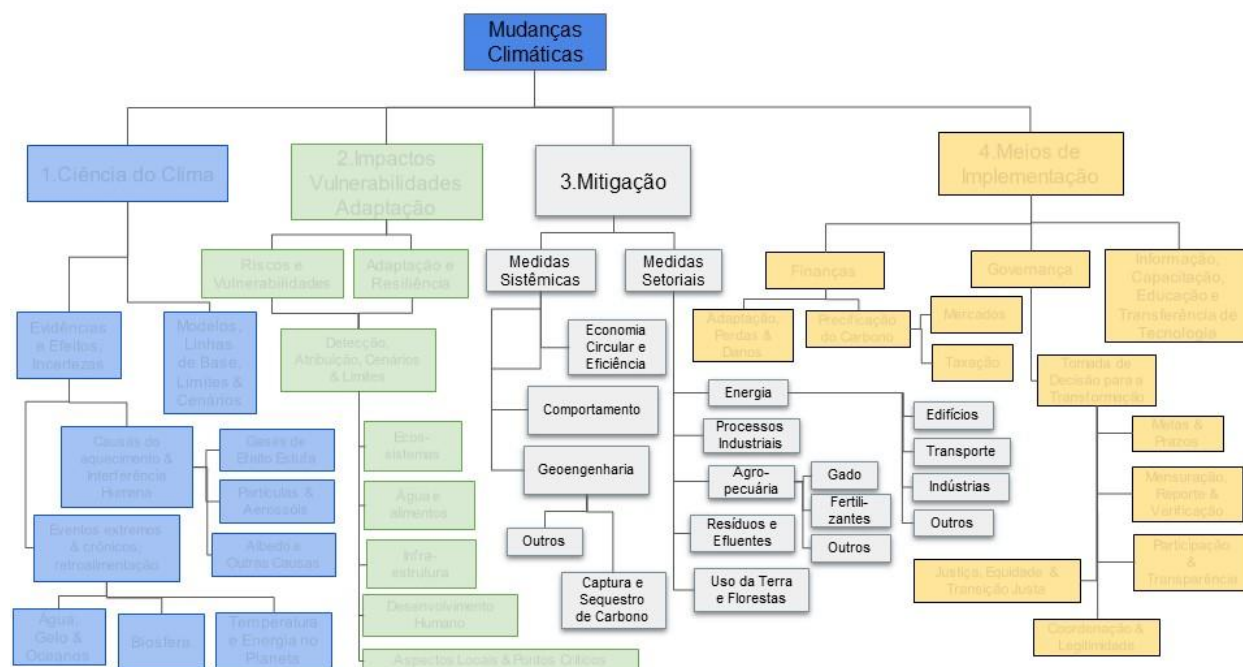
Um exercício que professores podem propor aos alunos é tirar fotografias e comentá-las. Outra é trazer notícias recentes que cite as palavras “aquecimento global”, ou “mudanças climáticas”. Basta para isso uma busca no Google ou em outra plataforma. O Google Imagens mostra várias fotos, diagramas e desenhos que podem ser copiados e colados em trabalhos escolares. Ao final deste livro são encontradas diversas plataformas interativas, algumas das quais tratam de impactos decorrentes das opções de políticas em medidas. É o caso da EN-ROADS, ilustrada abaixo, que como será visto a seguir também pode simular exercícios de mitigação.



Simulação de impactos climáticos em função de medidas adotadas: plataforma EN-ROADS (Climate Interactive, 2022)

Os professores podem ainda solicitar narrativas que estabeleçam conexões entre notícias, imagens e temas, ou ainda diagramas a exemplo do mapa mental proposto nesta obra. Com isso se estabelecem *ontologias* - domínios de entes de ciências, de um modo de vida, ou de referência da linguagem.

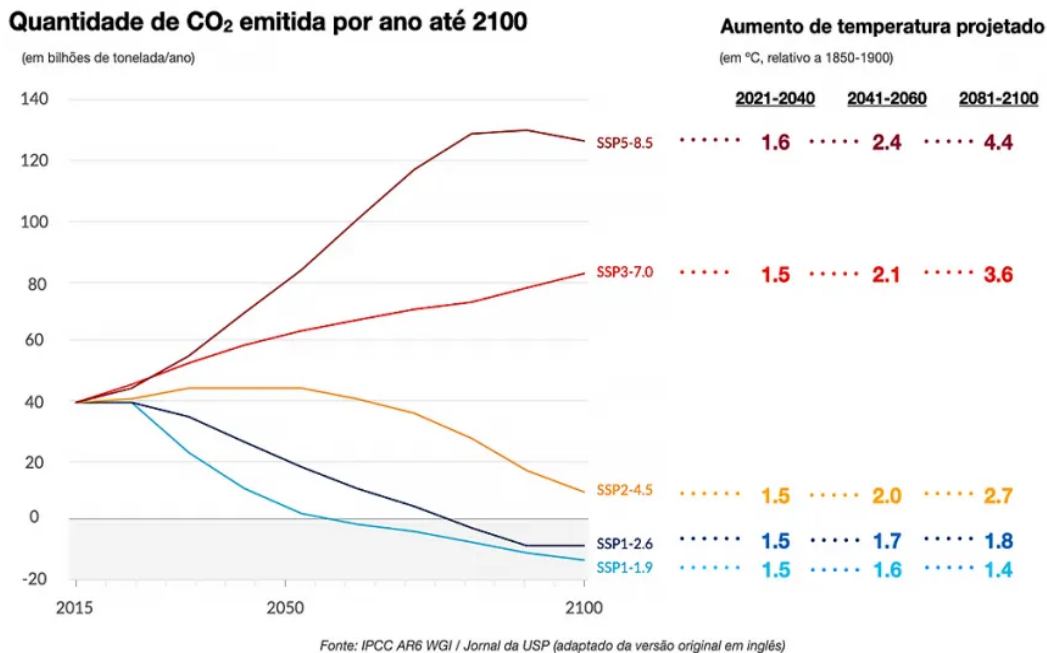
Parte 3. Mitigação



Sistematização parte 3, Mitigação e suas medidas (elaboração própria).

A **Mitigação** das mudanças climáticas representa um conjunto de intervenções humanas para reduzir as emissões ou aumentar os sumidouros de gases de efeito estufa. Em consonância com a Convenção do Clima de 1992, o objetivo final da mitigação é estabilizar os níveis (concentrações) de gases de efeito estufa na atmosfera de forma a reduzir o aquecimento global e com isso tentar manter o aumento médio da temperatura do planeta em níveis considerados seguros. Como visto na Parte 1, uma das condições para que isso ocorra é a neutralidade climática, ou emissões líquidas zero de gases de efeito estufa. O gráfico a seguir mostra algumas curvas onde isso acontece, inclusive pelo efeito de *remoções*, também chamadas de emissões negativas por conta do sequestro de carbono.

Nessa condição, as emissões antropogênicas (causadas pelo homem) de gases de efeito estufa são ponderadas em função de seus respectivos potenciais de aquecimento global e convertidas numa unidade comum chamada dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Desse total são descontadas as remoções de CO₂ (somente este gás), chegando-se ao CO₂e líquido, cujo objetivo é chegar próximo de zero até a metade deste século (*net zero*).



Relação entre as emissões de CO₂ e aumento de temperatura, conforme diferentes cenários SSP (Escobar e Magalhães, 2021, tradução literal de IPCC, 2021)

Em políticas climáticas, *medidas de mitigação* são tecnologias, processos ou práticas que contribuem para esses objetivos, que aqui para um melhor entendimento são classificadas em medidas setoriais e sistêmicas. *Potenciais de mitigação* são quantidades de reduções líquidas de emissões de gases de efeito estufa que podem ser alcançadas por uma determinada opção, relativa às linhas de base de emissão especificadas em cenários.

Um equívoco persistente é a percepção de que reduzir emissões afeta o desenvolvimento econômico e com isso os nossos padrões de vida. Um veículo moderno e eficiente pode chegar mais longe com a mesma quantidade de combustível em outro mais antigo. Morar mais perto da escola, do trabalho e da comunidade oferece muitas conveniências ao mesmo tempo em que reduz a energia necessária para o transporte. Dietas mais equilibradas oferecem muitos benefícios para a saúde humana. Ao se pouparem recursos naturais se reduzem também as quantidades de resíduos e se obtêm vantagens econômicas, competitividade e inovação.

Medidas Setoriais

Os principais gases de efeito estufa já foram descritos anteriormente. As tabelas a seguir revêem suas causas e antecipam algumas soluções.

Gás	Causa (por Setor)				
	Processos Industriais e Uso de Produtos	Energia	Agro-pecuária	Uso do Solo	Resíduos
CO ₂ , dióxido de carbono	Reações químicas para a fabricação de aço, cal e cimento	Combustão (queima, incineração)			
CH ₄ , metano		Emissões fugitivas (perdas)			Decomposição de matéria orgânica
		Queimas incompletas			
N ₂ O, óxido nitroso	Subproduto sintético de fertilizantes e fibras	Reações químicas a partir de NO _x	Fertilizantes e resíduos animais	Práticas de manejo	Efluentes, processos de nitrificação & denitrificação
Gases-F, fluorados	Uso e produção dos gases				

Gases de efeito estufa e suas origens (elaboração própria).

Entendendo as causas das emissões torna-se mais fácil compreender as soluções. As medidas setoriais aqui propostas seguem a lógica dos inventários de emissões de gases de efeito estufa, conforme as metodologias do IPCC.

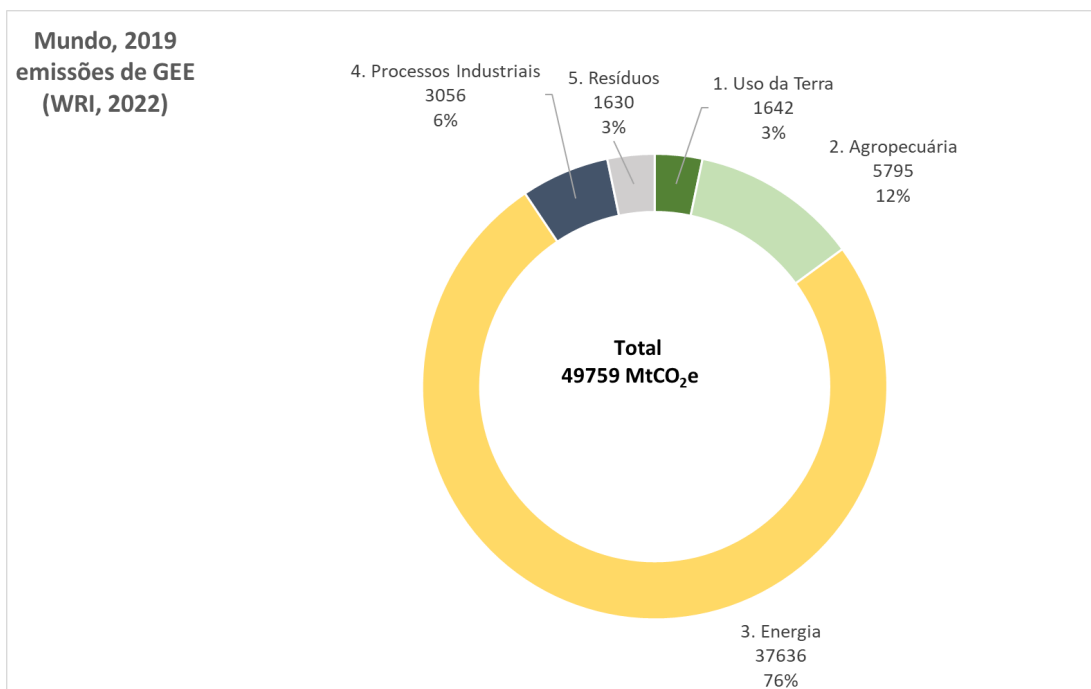
Gás	Soluções (por Setor)				
	Processos Industriais e Uso de Produtos	Energia	Agro-pecuária	Uso do Solo	Resíduos
CO ₂	Troca de insumos, eficiência	Descarbonização dos combustíveis (trocas), eficiência			
CH ₄	Troca de insumos, eficiência	Controle de perdas			Queima / Uso do biogás
N ₂ O		Eficiência e mudanças nos processos / manejo			
Gases F					

Gases de efeito estufa, esquema básico de opções de mitigação (elaboração própria).

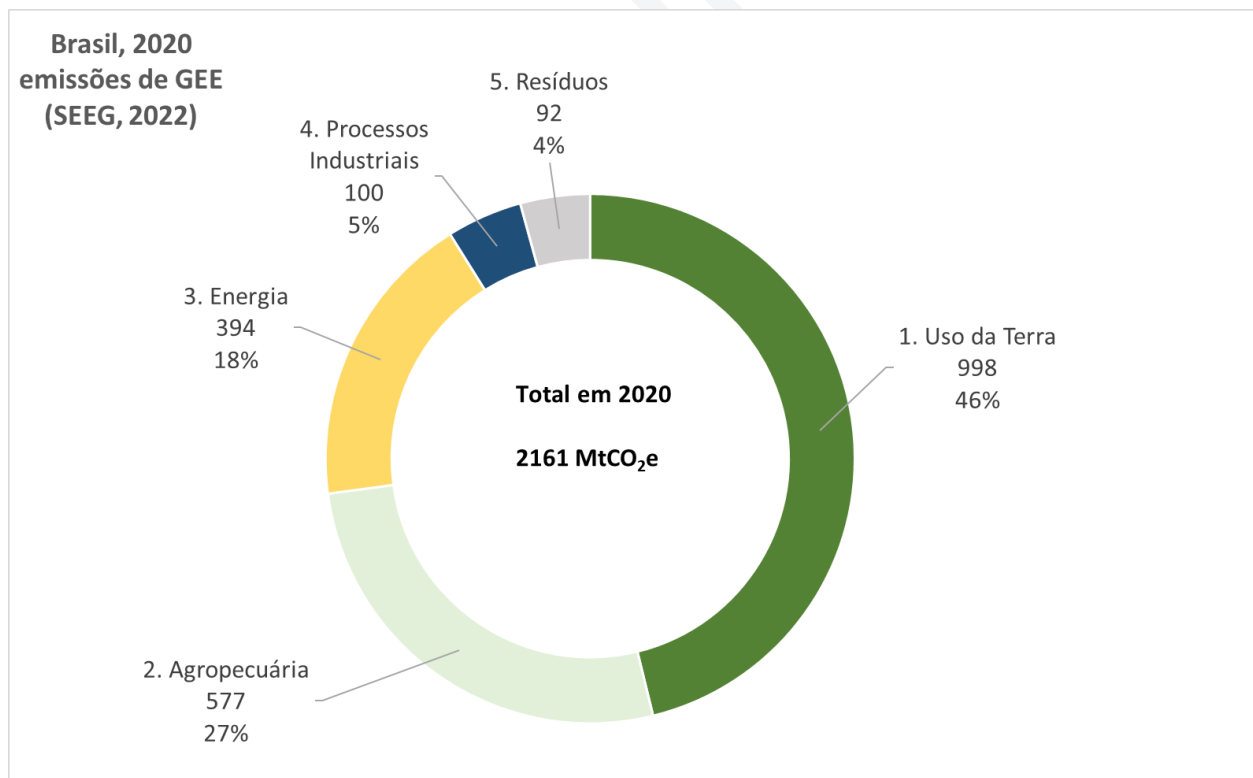
Um ponto importante em mitigação é o alcance das medidas. O ideal seria que uma dada medida atingisse de forma significativa um dado setor com grande contribuição para as emissões totais.

Olhando-se a *matriz mundial de emissões* fica claro que o setor *Energia* (que inclui transportes, edifícios, combustão industrial e outros usos) é o maior emissor e portanto o principal foco das ações de mitigação.

No Brasil a situação é um pouco diferente. Aqui, a maior causa de emissões são as *Mudanças (ou Alterações) do Uso da Terra (ou do Solo)*, principalmente por conta do desmatamento. A *Agropecuária* tem um peso considerável e a *Energia* vem em terceiro lugar. Nosso país emite cerca de 3% do total mundial.



Emissões mundiais de gases de efeito estufa no ano de 2019 (elaboração própria a partir de WRI, 2022)



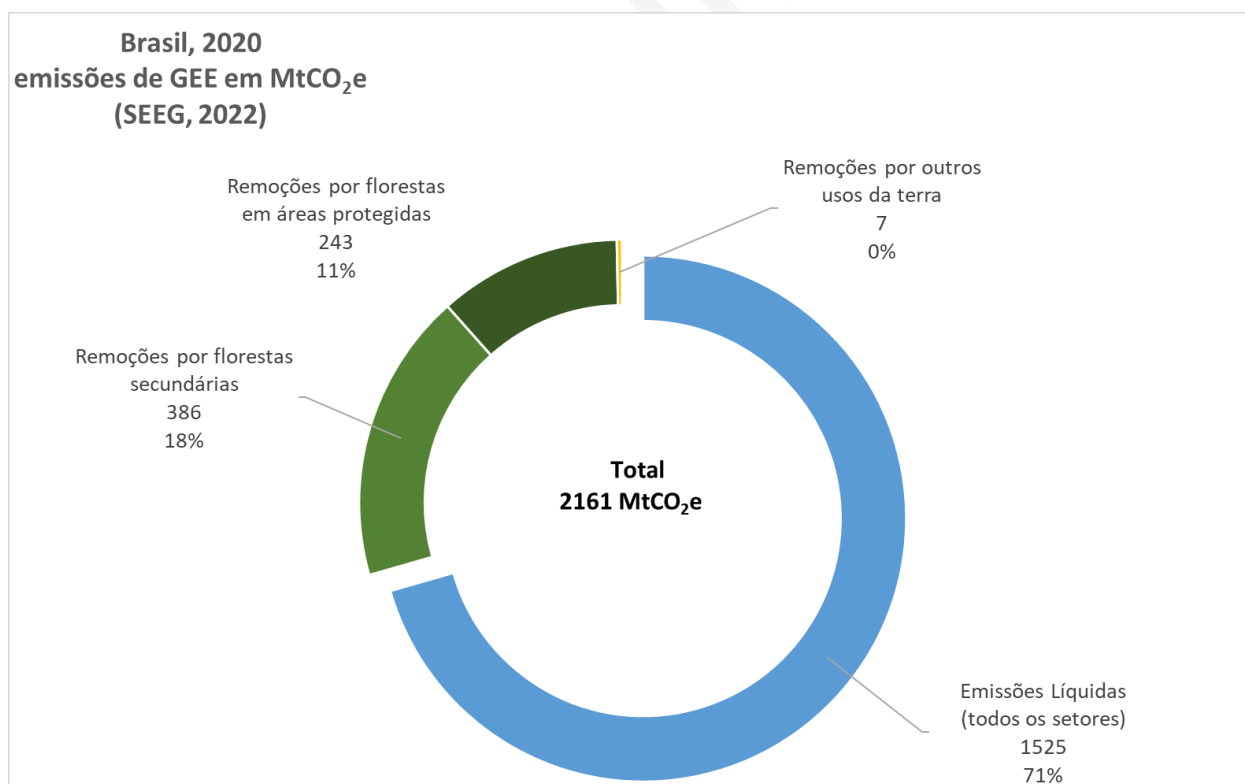
Emissões brutas de gases de efeito estufa no Brasil (elaboração própria a partir de SEEG, 2022).

O desmatamento é a grande causa das emissões no país. Este está associado à Mudança no Uso da Terra, onde florestas são convertidas em pastagens, em terras agricultáveis ou até mesmo em áreas mais

degradadas. A queima emite principalmente CO_2 , quando o carbono contido na biomassa se liga ao oxigênio da atmosfera (quimicamente $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$).

O caminho inverso é a *remoção* de CO_2 . Quanto a vegetação cresce, incorpora por meio de *fotossíntese* o gás carbônico da atmosfera e por ação da luz do Sol o converte em açúcares (quimicamente $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{luz do sol} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$) e posteriormente em moléculas maiores como amido e celulose. Grosso modo, quanto mais as árvores crescem mais elas capturam o CO_2 do ar.

Este é o caso das *florestas e matas secundárias*, as que se regeneram após uma grande perturbação (fogo, extração ou corte de madeira, por exemplo) por um período longo o suficiente para que os efeitos da perturbação já não sejam evidentes. Elas se distinguem de *florestas primárias*, de crescimento antigo e normalmente em áreas protegidas, que não sofreram tais interrupções. Como se pode ver a seguir, as remoções das florestas secundárias são maiores que a das primárias (em áreas protegidas). Isso não significa absolutamente que há mais florestas secundárias do que primárias em termos de área: um *hectare* (unidade de área equivalente a 10 mil metros quadrados, ou um quadrado de 100 metros de lado) de floresta secundária que está crescendo absorve muito mais carbono do que um hectare de floresta primária já consolidada. Há outras formas de remoção não quantificadas no inventário nacional. É o caso da biomassa oceânica (algas principalmente).

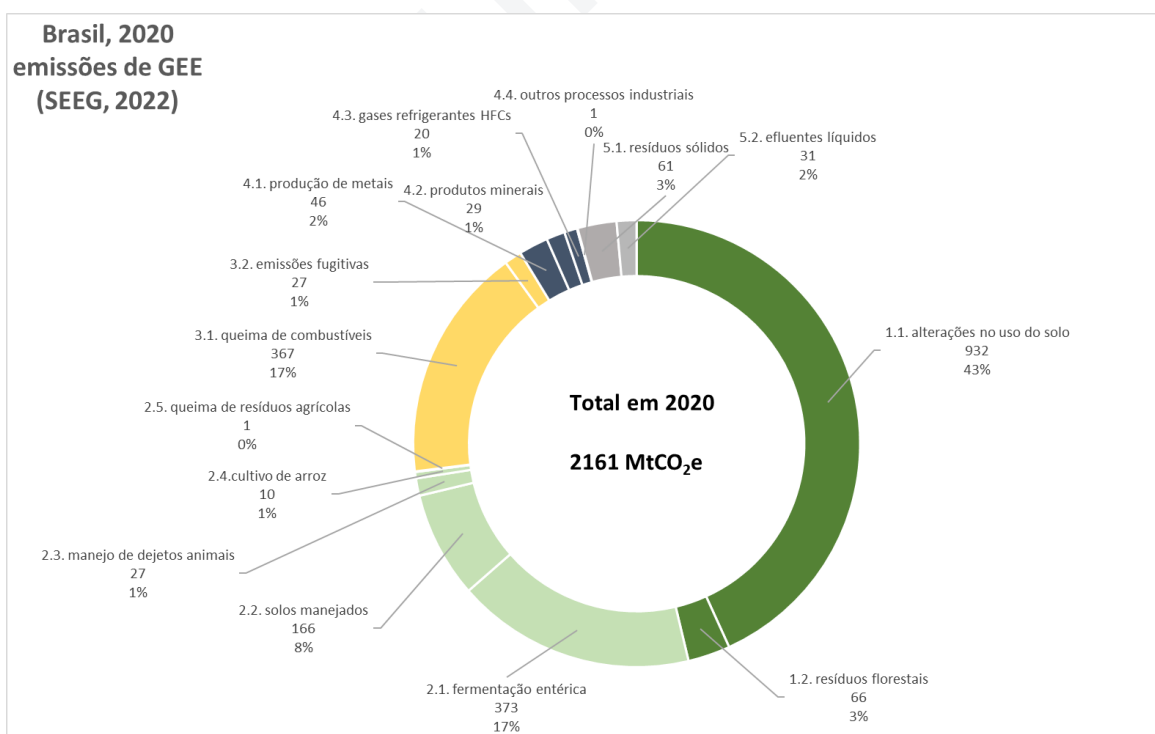


Remoções e emissões líquidas de gases de efeito estufa no Brasil em 2020 (elaboração própria a partir de SEEG, 2022)

Não fossem as remoções, o Brasil teria lançado na atmosfera no ano de 2020 um total de 2161 milhões (ou 2,16 bilhões) de toneladas de CO₂ equivalente (cuja notação é MtCO₂e). Essas são as emissões brutas contabilizadas. Descontadas as remoções (386+243+7 = 636 MtCO₂e nesse mesmo ano), temos as emissões líquidas (1525 MtCO₂e). Vale lembrar, a unidade CO₂e (ou como preferem alguns CO₂eq) representa todos os GEE que compõem a emissão, em razão de seus potenciais de aquecimento global (GWP). As estimativas nacionais de emissão de gases de efeito estufa aqui apresentadas vêm da base de dados do SEEG (2022). Quem quiser se aprofundar pode utilizar desta ampla base, além de outras bastante interessantes, caso do MAPBIOMAS (2022) que aponta as alterações no uso da terra. O anexo desta obra traz essas e outras ferramentas úteis ao ensino da temática das Mudanças do Clima.

Voltando à distribuição de emissões no Brasil, a figura a seguir apresenta uma classificação subsetorial, seguindo o código de cores dos setores principais. Algumas conclusões que dela podem ser extraídas são:

- O desmatamento é o principal “vilão” das mudanças no uso do solo. Contê-lo depende tanto de medidas de *comando e controle* (monitoramento, fiscalização e punição à ilegalidade), quanto de *regulação* (criação de novas áreas de conservação, melhoria dos sistemas de controle), *financiamento* (opções econômicas para as populações que habitam a área, incentivos à conservação e à recomposição de ecossistemas e desincentivos a atividades poluidoras) e *conscientização* (sobre as formas atuais e alternativas de produção e consumo, não somente na região mas em todos os mercados que consomem seus produtos).



- Ainda neste setor, melhores práticas (eficiência) podem reduzir a quantidade de *resíduos florestais*. Estes podem, pelo menos em parte, ser utilizados para produção de energia (desde que isso não induza mais desmatamento).
- Passando ao setor *Agropecuário*, neste a maior parte das emissões vem do metano gerado pela *fermentação entérica* bovina (no trato digestivo, pela ruminação). Estas podem ser reduzidas através de melhores práticas de manejo (alimentação balanceada, tempo para o abate e outros), além da substituição da dieta pelos consumidores (por vegetais e/ou outro tipo de proteína animal produzida com menor ou sem ruminação, caso de aves e peixes, ovinos e outros) e pela eficiência, traduzida pela minimização de perdas em todas as fases do processo (por exemplo, agregando valor ao produto, evitando que se estrague através de melhor acondicionamento etc).
- Ainda na agropecuária, o manejo de dejetos animais emite metano e óxido nitroso, o que pode ser minimizado tanto na etapa de geração (pelo confinamento, recolhimento e tratamento dos resíduos) quanto no consumo final dos produtos (como relatado pouco acima)
- O subsetor agropecuário seguinte são os *solos manejados*. Aqui, a principal causa é a emissão de óxido nitroso pela aplicação de fertilizantes sintéticos (produzidos a partir de petróleo e gás natural). A redução dessas emissões pode ser feita, em primeiro lugar, reduzindo as taxas de aplicação, eliminando os excessos desnecessários. Depois, através da adoção de outras soluções mais naturais, como fertilizantes biológicos.
- No Brasil, o *cultivo de arroz* ocorre geralmente em terras secas, prevenindo o metano gerado em áreas alagadas (um problema muito maior no sudeste asiático). Da mesma forma, a *queima de resíduos agrícolas* aparece com um percentual muito baixo. Em ambos os casos, contudo, ações de eficiência podem reduzir as já baixas emissões.
- Passando agora ao setor *Energia*, este se desmembra em diversos subsetores (edifícios, indústrias, transporte e outros) e *energéticos* (combustíveis e eletricidade). Regra geral, as estratégias de mitigação de emissões passam por *eficiência* (conservação de energia, diminuição do consumo para se obter um mesmo serviço final, redução de perdas e de emissões fugitivas, dentre várias alternativas) e *descarbonização* (troca de combustíveis e eletricidade de origem fóssil por energia de fontes renováveis e nuclear). Para ilustrar, a tabela a seguir reproduz a estrutura de um balanço energético fazendo uma classificação.

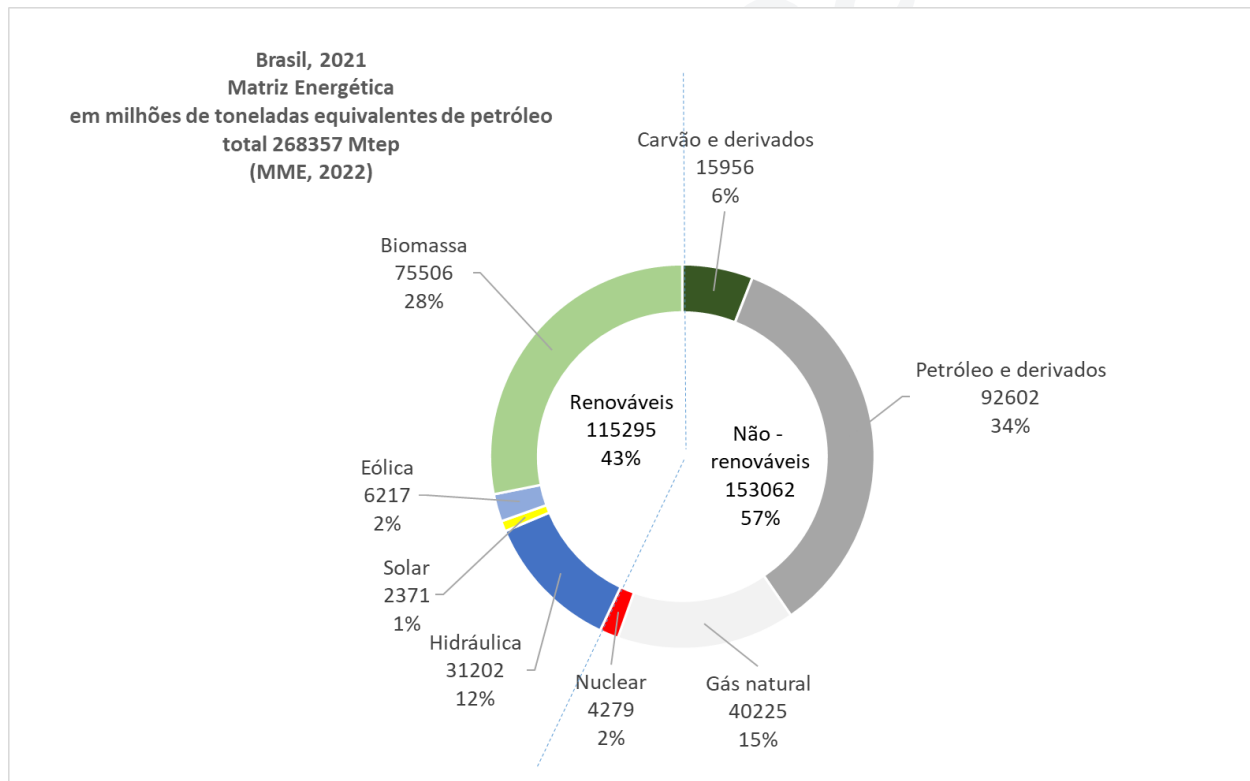
Fontes	Energéticos e seus derivados	
Não-renováveis	Fósseis	Carvão (coque de carvão, bem como termoeletricidade e calor a partir desses insumos)
		Petróleo (e derivados como óleo diesel, gasolina, querosene, gás liquefeito de petróleo, querosene, nafta e outros, bem como termoeletricidade a partir desses insumos)
		Gás natural (e sua termoeletricidade)
	Nuclear, urânio (termoeletricidade)	
Renováveis	Hidráulica (hidreletricidade e, em raros casos, força motriz)	
	Solar (eletricidade em painéis fotovoltaicos, calor para geração de termoeletricidade e aquecimento)	
	Eólica (eletricidade)	
	Geotérmica (calor para geração de termoeletricidade e aquecimento local)	
	Oceânica (eletricidade a partir das ondas, correntes e mudança de marés)	
	Biomassa tradicional (lenha, esterco, carvão vegetal) e moderna (combustíveis renováveis e resíduos, incluindo biocombustíveis)	

Fontes de energia e sua classificação (Goldemberg e Lucon, 2009)

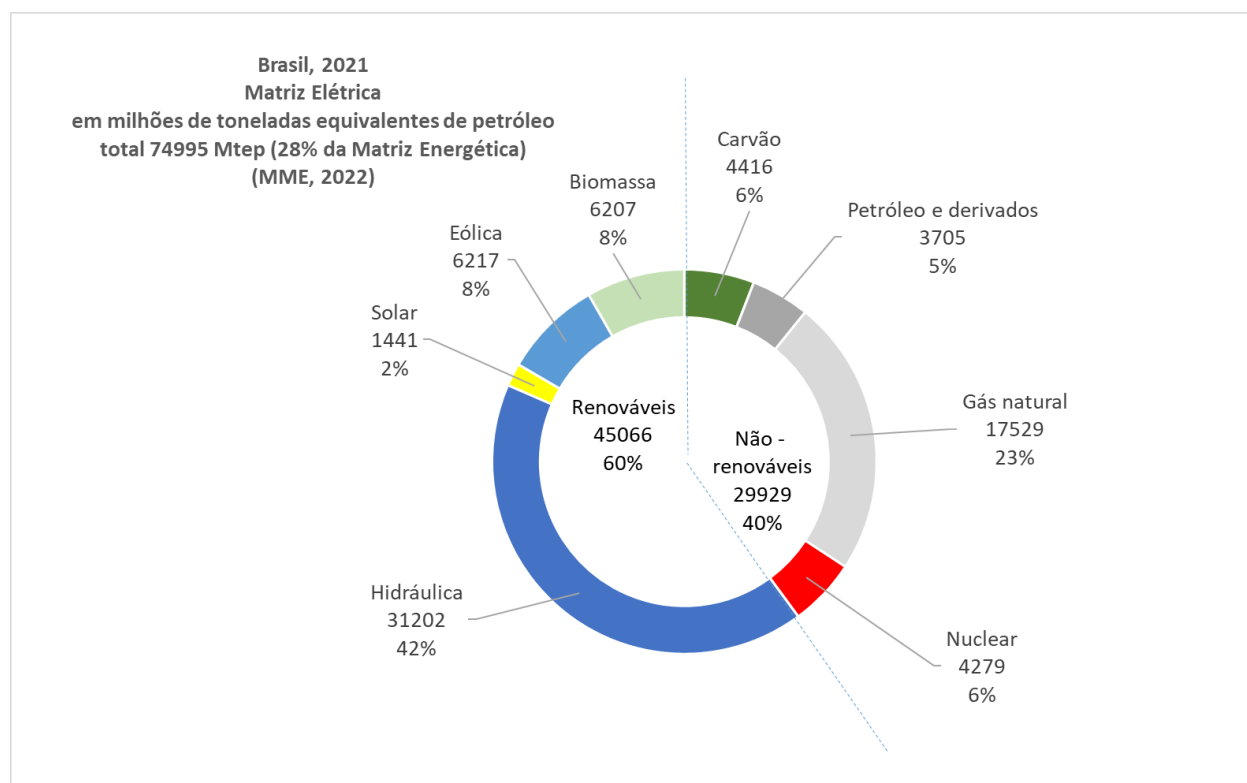
- As fontes *fósseis* predominam na matriz energética nacional. Isso ocorre praticamente em todo o mundo e o Brasil relativamente tem uma forte componente renovável em sua matriz, conforme mostra a figura a seguir com unidades energéticas (toneladas de petróleo equivalente). Isso não nos deixa numa situação acomodada: devemos reduzir o consumo de energias fósseis, tanto o proporcional quanto o total, se quisermos mitigar emissões de gases de efeito estufa, principalmente o CO₂.
- De uma forma extremamente simplificada as fontes *renováveis* não emitem CO₂. A energia *hidráulica* provém das chuvas e geleiras; a *solar* da radiação e a *eólica* da força dos ventos. As energias geotermal e oceânica no Brasil têm produção virtualmente zero. A *biomassa* é exceção, pois sua queima emite CO₂; contudo pode-se dizer que a emissão líquida desse gás é próxima de

zero. A razão é a de que a matéria orgânica vegetal incorpora esse gás no ciclo da fotossíntese, levando a um balanço líquido próximo do neutro. Cabem aqui duas observações: (i) os demais gases de efeito estufa (CH_4 e N_2O) não têm esse mesmo comportamento; e (ii) as fontes fósseis de energia também têm a origem na biomassa, porém isso ocorreu milhões de anos atrás e por convenção não são consideradas renováveis.

- A eletricidade termonuclear, também chamada de energia *nuclear*, emite quase nenhum CO_2 se considerarmos apenas a geração nas usinas. Contudo, as etapas de mineração, enriquecimento do urânio e descomissionamento (desmontagem da usina após sua vida útil e acondicionamento permanente dos resíduos) têm emissões em seu ciclo de vida. Por questões de segurança, o assunto ainda é bastante sensível e também por conta de medidas preventivas os custos dessa tecnologia vêm aumentando.
- Conceitualmente é muito importante distinguir a *matriz elétrica* da *matriz energética*. A primeira faz parte da segunda. A matriz energética abrange outros combustíveis e usos, como por exemplo o diesel, a gasolina e o querosene de aviação no transporte.



Matriz energética do Brasil em 2021 (elaboração própria a partir de MME, 2022)



Matriz elétrica do Brasil em 2021 (elaboração própria a partir de MME, 2022)

- Recapitulando, a mitigação de emissões de GEE no setor Energia pode se dar, basicamente, por:
 - (i) *descarbonização*, isto é, troca de energéticos por outros que emitem menos pela mesma unidade de energia utilizada; e (ii) *eficiência*, que pode ser tanto tecnológica (conservação, trocas de processos) quanto por racionalização no uso (menos uso por substituição de necessidades).
- Essas medidas são aplicáveis aos diversos usos finais energéticos, a seguir classificados, sendo que cada um desses subsetores possuem estratégias possíveis de descarbonização e eficiência
 - Produção de Energia (petróleo, etanol, biodiesel e outros)
 - Transportes
 - Aéreo
 - Hidroviário (marítimo, fluvial e de cabotagem)
 - Ferroviário
 - Rodoviário
 - Pesado (caminhões e ônibus)
 - Leve (automóveis, motocicletas e comerciais utilitários)
 - Dutoviário (tubulações)
 - Edifícios
 - Residenciais

- Comerciais
 - Públicos (inclusive estações de tratamento de água)
- Agropecuária (uso de energia somente em máquinas, tratores e outros veículos *offroad*)
- Indústrias, de diversos subsetores
 - Ferro-gusa e aço (siderúrgicas)
 - Cimento e Cal
 - Ferro-ligas (alumínio, zinco e outros)
 - Não-ferrosos e outros produtos da metalurgia
 - Mineração e pelletização de minerais
 - Alimentos, fumo e bebidas
 - Têxtil
 - Química (fina e pesada) e Petroquímica
 - Papel e Celulose
 - Cerâmica
 - Outras Indústrias (mecânica, vidro etc)
- Como a infraestrutura energética é bastante cara e de grande volume, e como é importante que o fornecimento de energia (eletricidade e combustíveis) não sofra interrupções (segurança energética), o planejamento deve ser bastante criterioso e, na medida do possível, socioambientalmente responsável (isto é, não prejudicar populações e o meio ambiente).
- O próximo setor, *Processos Industriais e Uso de Produtos* não se refere ao consumo de energia nas indústrias, mas sim
 - às reações químicas utilizadas para a produção de aço, cimento, cal e alguns outros insumos;
 - ao uso de determinados gases na maioria dos sistemas de refrigeração e ar condicionado (HFCs);
 - ao uso de outros gases para produzir componentes eletrônicos e outras necessidades da indústria.
- Neste setor as ações de mitigação estão tanto em *eficiência* (usar ou perder menos desses gases) quanto em *trocas de insumos* (gases por outros de menor potencial de aquecimento global), ou ainda em *outras tecnologias* (sistemas de refrigeração a amônia, por exemplo) e obviamente na racionalização da utilização desses produtos (troca de ar condicionado por ventilação natural, por exemplo, deixando de usar HFCs).
- O setor de *Resíduos*, por sua vez, tem grandes potenciais de mitigação através da captura e queima (com ou sem aproveitamento energético) do biogás, composto predominantemente por

metano. A simples queima do metano (em *flares*, por exemplo) o converte em dióxido de carbono (quimicamente $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$) e com isso reduz o potencial de aquecimento global (GWP) em 28 vezes. Se houver o aproveitamento energético onde o biogás (ou sua versão mais nobre, o biometano) substitui um combustível fóssil (como gás natural), o ganho é ainda maior. O biogás é formado pela digestão anaeróbica (isto é, com pouca presença de oxigênio) por bactérias da fração orgânica dos resíduos e efluentes, portanto uma fonte considerada renovável de energia que substitui as fósseis. Assim, os maiores potenciais estão onde essa parte (carga) orgânica é mais concentrada, caso dos aterros sanitários controlados e de alguns tipos de efluentes das indústrias de bebidas (cerveja principalmente), papel e celulose (licor negro ou lixívia). Obviamente, ações de consumo consciente que minimizem a geração de resíduos podem ser chamadas de eficiência e com isso também contribuem para a mitigação.

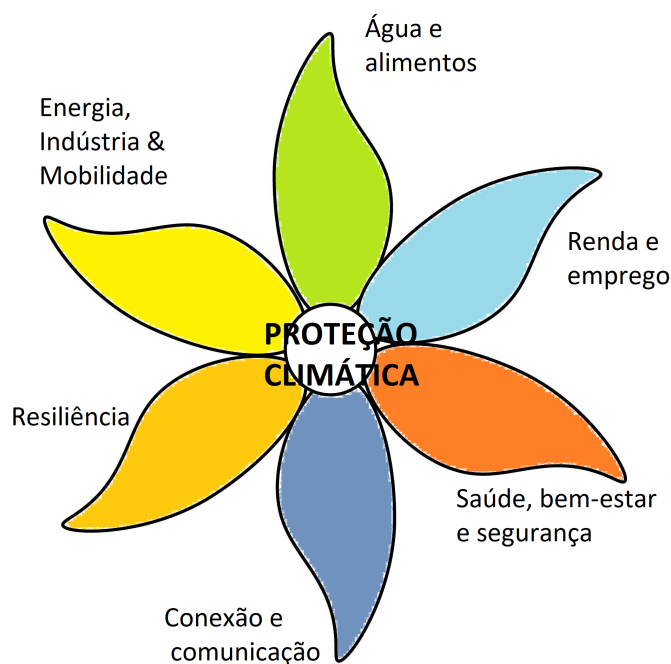
Medidas Sistêmicas

Algumas medidas de mitigação climática são transversais em relação a dois ou mais setores. São as chamadas soluções sistêmicas, que requerem ações coordenadas e bem planejadas.

Este é o caso das ações nas *Cidades* e demais assentamentos urbanos, como povoados, vilas, distritos e regiões metropolitanas

- As cidades emitem gases de efeito estufa diretamente, através da queima de combustíveis no transporte, comércio, serviços, residências e algumas indústrias;
- Os habitantes das cidades consomem alimentos, eletricidade e materiais diversos (como madeira, cimento e aço), em cuja produção há emissões associadas e, portanto, consideradas indiretas;
- O planejamento urbano influencia fortemente onde as pessoas habitam, trabalham e estudam - e portanto influencia nos deslocamentos e no consumo de energia;
- As emissões podem ser mitigadas pelo gerenciamento de resíduos (aterros adequados com captura de biogás, por exemplo) e a prevenção de sua geração (através de uma economia circular, redução nas embalagens e minimização de perdas);
- A distribuição e proporção de áreas verdes nas cidades influencia na absorção de carbono e em outras chamadas *soluções baseadas na natureza*.

A adoção desse e de outros conjuntos de medidas consideradas sistêmicas apresenta uma série de co-benefícios, que se reforçam mutuamente.



Co-benefícios e outras sinergias aplicáveis à proteção climática (elaboração própria)

Por outro lado, algumas decisões de curto prazo podem ser difíceis ou impossíveis de se reverterem, comprometendo o desempenho (e com isso as emissões e o bem-estar) das cidades por muitas décadas. Um edifício mal projetado ou construído pode ser vulnerável a impactos (com deslizamentos de terra, enchentes, avanço do nível do mar, ondas de calor e outros eventos extremos). Pode também consumir muita energia com ar condicionado ou iluminação artificial para obter níveis de conforto que poderiam ser obtidos através de luz e ventilação naturais. Uma cidade sem calçadas e ciclovias incentiva a motorização. Bairros-dormitórios sem transporte público de qualidade longe dos locais de trabalho e estudo estimulam o uso de automóveis particulares. Fundos de vale transformados em avenidas perdem a oportunidade de se tornarem parques. Da mesma forma, áreas de vegetação desprotegidas podem ser invadidas ou tomadas pela especulação imobiliária. Um processo poluente licenciado (como uma termelétrica a combustíveis fósseis) compromete a expansão elétrica descentralizada baixo carbono

Sistemas alimentares são outro exemplo dessas medidas. Em primeiro lugar, as perdas e outras formas de desperdício acabam incorrendo em mais impactos, incluindo emissões de gases de efeito estufa. A má distribuição de comida também afeta o desenvolvimento humano numa série de formas. Opções de dieta são escolhas individuais, pelo menos em princípio (desde que todos possam escolher, o que incorre numa questão de equidade e acesso). A produção local de alimentos pode ser mais saudável e diversificada, reduzindo o transporte associado, gerando empregos e renda.

Já mencionadas, as *Soluções Baseadas na Natureza* (SBN) apresentam vários cobenefícios. Além de incorporarem carbono na biomassa, a arborização e outros tipos de recomposição vegetal contribuem para a redução das ilhas de calor, estabilidade dos morros, aumento da permeabilidade do solo, proteção das nascentes e com isso maior disponibilidade de água, contenção de dunas de areia e erosões, redução dos impactos do avanço do nível do mar, melhoria da qualidade do ar. A proteção de

corpos d'água superficiais (rios, lagos e outros) e subterrâneos aumenta a segurança hídrica e evita obras dispendiosas para transportar água entre bacias. A conservação da biodiversidade preserva espécies importantes, como abelhas e outros agentes polinizadores, e predadores de larvas de mosquitos (além de outros vetores de doenças transmissíveis).

Esses temas são muito amplos e importantes, que merecem ser explorados durante o ensino das mudanças climáticas. Alguns autores chamam medidas de mitigação com co-benefícios em adaptação de *Mit-Ad* (plantar árvores incorpora carbono e estabiliza encostas); se for o oposto, são *Ad-Mit* (remoção de populações em áreas alagáveis para locais mais próximos de onde estudam e trabalham, reduzindo a demanda por transporte motorizado).

Outro tipo de medidas sistêmicas são as chamadas de *Geoengenharia*, uma categoria bem ampla.

- A primeira é chamada de gerenciamento de albedo, melhoria da reflexão da luz e redução da incorporação de calor.
 - Uma dessas visões da geoengenharia beira a ficção científica e traz riscos inimagináveis: lançar produtos para cobrir a atmosfera com superfícies reflexivas. Algumas outras idéias de gerenciamento de albedo não se mostraram viáveis: é o caso de cobrir com mantas plásticas brancas montanhas onde um dia havia geleiras.
 - Trazendo à realidade esse conceito temos o gerenciamento do albedo: aumento da reflexão das superfícies terrestres adotando telhados brancos e pavimentos claros. Grosso modo, trocar um telhado escuro (de fibrocimento com fuligem, por exemplo) por um pintado com tinta reflexiva apropriada (não necessariamente branca) mitiga por ano cerca de 10 toneladas de CO₂ para cada metro quadrado.



Exemplo tradicional de gerenciamento de albedo e conforto térmico: Santorini, Grécia (Pixhere, 2022).

- A segunda envolve a captura e armazenamento de carbono (em inglês *CCS*), grosso modo recolher o CO₂ emitido por processos de grande porte (termelétricas, indústrias), “limpar” esse gás (remover impurezas) e armazenar em depósitos subterrâneos (aquíferos, cavernas, rochas porosas e outros) de forma segura e permanente.
 - Muitos cenários climáticos consideram *emissões negativas*, suposições nas quais a remoção de CO₂ é superior à emissão dos GEE (CO₂ e demais, convertidos em métricas de CO₂e). Isso em larga escala envolve o CCS, é algo desejável mas na prática impossível.
 - A tecnologia do CCS ainda está em desenvolvimento. Ela não envolve somente recolher, limpar e comprimir o gás, mas também estocar o gás de forma que não ocorram vazamentos (ou outros impactos) e fazer tudo isso a custos acessíveis.
- A forma mais segura e conhecida de estocar carbono é aumentar a cobertura vegetal. É conter o desmatamento, recompor áreas degradadas, conservar e manter conservadas “eternamente” essas áreas. Isso parece lógico, mas envolve também uma não-utilização dessas áreas para outros fins, como a agricultura. Por outro lado, não conservar compromete o fornecimento de água doce e todo o equilíbrio do sistema climático, levando a prejuízos ainda maiores.

Um exercício simples

Passando do complexo ao básico, um exercício para que estudantes possam avaliar potenciais de mitigação parte da tabela a seguir, que propõe fatores de emissão e de remoção (reincorporação de gases em matéria orgânica por vegetação) para CO₂ aplicáveis a dados cotidianos de atividade.

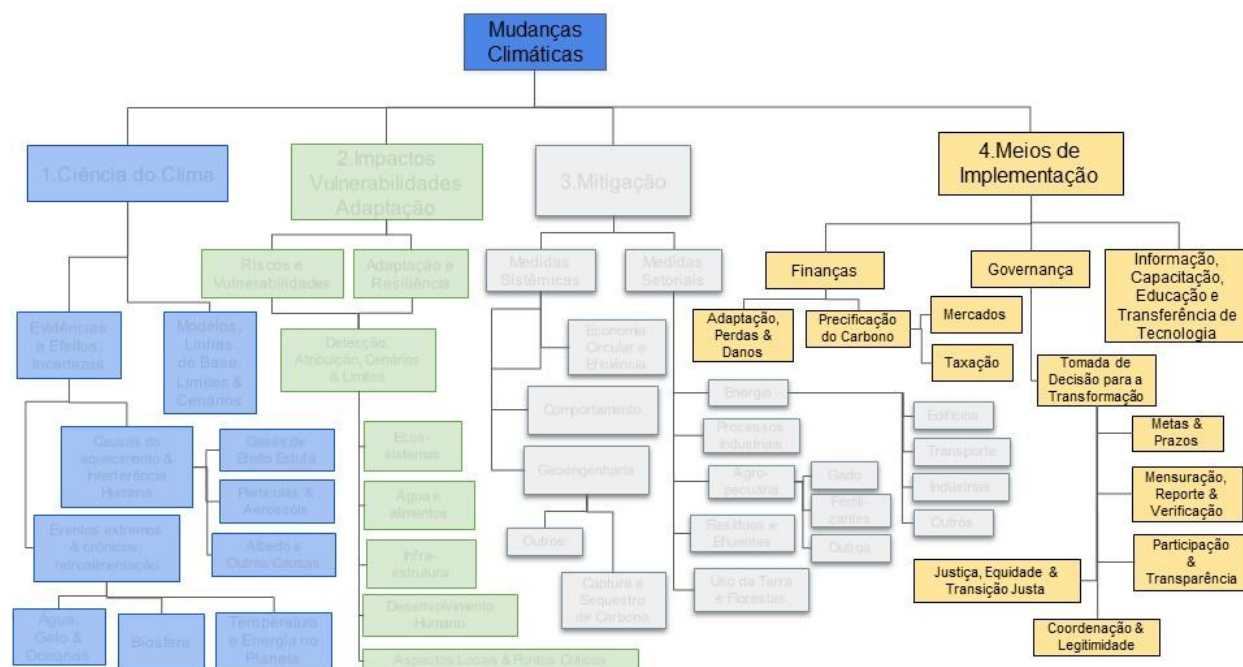
As remoções compensam as emissões e se baseiam no plantio de árvores, sempre lembrando que áreas degradadas devem ser recompostas preferencialmente com espécies nativas, garantindo as condições para a biodiversidade. Os projetos precisam ser perenes e rastreáveis: a mera distribuição de mudas não garante que estas serão plantadas e o plantio indiscriminado não assegura que as mudas irão permanecer naquele local.

Após os cálculos, professores e estudantes podem discutir algumas diretrizes para a ação.

Atividade	kg CO₂
Papel de escritório não reciclado, kg	0,31
Lixo doméstico em aterros, kg	0,74
Esgotos sanitários, por habitante por dia	0,003
Consumo de eletricidade, kWh	0,05-0,28
Viagem aérea longa, 1000 milhas	68,3
Diesel, litro	2,62
Gasolina, litro	2,29
Gás natural, metro cúbico	1,93
Automóvel a gasolina, km	0,1-0,2
Ônibus e caminhão a diesel, estrada e urbano, km	0,05-0,20
Árvore crescida, conforme a espécie (7 a 30 anos), unidade plantada (remoção)	200 - 800
Mata secundária (30 anos), hectare recomposto de área degradada (remoção)	2667

Fatores de emissão e remoção de CO₂ indicativos para atividades antropogênicas no Estado de São Paulo (Goldemberg e Lucon, 2009).

Parte 4. Meios de Implementação



Sistematização parte 4, Meios de Implementação e temas associados (elaboração própria).

Os meios de implementação podem ser entendidos como condições de habilitação e aumento da viabilidade das opções de adaptação e mitigação climática. Estas incluem informação para induzir mudanças no comportamento e estilos de vida humanos, finanças, inovação tecnológica e transferência de tecnologia, melhor governança com fortalecimento de instrumentos de política, capacidade institucional, participação multinível, capacitação e educação.

A viabilidade refere-se ao potencial de uma opção de mitigação ou adaptação a ser implementada. Os fatores que influenciam a viabilidade são dependentes do contexto, temporalmente dinâmicos e podem variar entre diferentes grupos e atores. A viabilidade depende de fatores geofísicos, ambientais-ecológicos, fatores tecnológicos, econômicos, socioculturais e institucionais que permitem ou restringem a implementação de uma opção. A viabilidade das opções pode mudar quando opções diferentes são combinadas e aumentam quando as condições favoráveis são reforçadas.

Finanças climáticas

Não existe uma definição acordada de financiamento climático. O termo 'financiamento climático' é aplicado aos recursos dedicados a enfrentar as mudanças climáticas por todos os atores públicos e privados, de escala global a local, incluindo fluxos financeiros internacionais para países em desenvolvimento para ajudá-los a enfrentar as mudanças climáticas. O financiamento climático visa reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa e/ou melhorar a adaptação e aumentar resiliência aos impactos das mudanças climáticas atuais e projetadas. As finanças podem vir de empresas privadas e públicas fontes, canalizado por vários intermediários, e é fornecido por uma série de instrumentos, incluindo subsídios, dívida concessional e não concessional e realocações orçamentárias internas

Há vários subcapítulos para o tema Finanças Climáticas. Dentre eles, tem-se:

- *Precificação de Carbono*: preço das emissões evitadas ou liberadas de dióxido de carbono (CO₂) ou seu equivalente com outros GEE (CO₂eq), o que pode se referir a uma *taxa* (imposto) sobre o carbono ou ao preço das licenças de emissão (*mercado* com um sistema de tetos definidos e comércio das permissões);
- *Financiamento à Adaptação e/ou Mitigação*: transferência de recursos para ações preventivas ou reativas em adaptação climática;
- *Perdas e Danos*: mecanismo criado para lidar com os prejuízos (econômicos ou não econômicos) associados a impactos de mudanças climáticas, incluindo eventos extremos e eventos de início lento, em países em desenvolvimento que são particularmente vulneráveis;
- *Ativos encalhados*: bens e recursos (como por exemplo campos de petróleo ou termelétricas a carvão) expostos a desvalorizações ou conversão para “passivos” devido a mudanças imprevistas nas suas expectativas de receitas, devido a inovações e/ou evoluções do contexto de negócios, incluindo mudanças em hábitos e preferências dos consumidores, ou nas leis e outras regulamentações.

Governança

Entende-se por *Governança* o conjunto de estruturas, processos e ações por meio dos quais os atores públicos e privados interagem para atingir objetivos sociais. Isso inclui instituições formais e informais e as normas, regras, leis e procedimentos para decidir, gerenciar, implementar e monitorar políticas e medidas em qualquer escala geográfica ou política, do global ao local.

Por sua vez, a Governança climática se refere às estruturas, processos e ações por meio dos quais os atores privados e públicos procuram mitigar e se adaptar às mudanças climáticas.

A Governança pode ser multinível (dispersa em vários níveis de jurisdição e tomada de decisão, incluindo os níveis global, regional, nacional e local, bem como os níveis transregional e transnacional), inclusive policêntrica (envolvendo vários centros de tomada de decisão com jurisdições sobrepostas, com algum grau de autonomia mas também levando em conta uns aos outros, coordenando suas ações e buscando resolver conflitos). Um grande desafio é estabelecer uma adequada coordenação entre os entes governamentais, reconhecendo a legitimidade de entes supranacionais.

Fortalecer a capacidade de governança significa agir junto às instituições, líderes de governo e sociedade civil (inclusive empresas) para melhor planejar, coordenar, financiar, implementar, avaliar e ajustar políticas e medidas a curto, médio e longo prazos. Isso reduz as incertezas, possibilita mudanças rápidas e abrangentes sobre múltiplos atores e demandas.

São múltiplos os aspectos de Governança a serem abordados: Alguns são os seguintes:

- *Metas e prazos*: compromissos assumidos de desempenho de uma dada economia (país, região, empresa) a atingir um determinado objetivo (por exemplo, cortar emissões ou financiar atividades) de forma aferível (preferencialmente mensurável, reportável e verificável) até determinadas datas. Podem ser atrelados a caminhos, rotas e estratégias, ou ainda a metas e prazos intermediários.
- *Mensuração, Reporte e Verificação (MRV)*: são três termos que caminham juntos, para comprovar a consistência e integridade de medidas de mitigação e adaptação climáticas. Mensuração se refere a processos de coleta de dados ao longo do tempo, fornecendo conjuntos de dados básicos, incluindo acurácia e precisão, para o intervalo de variáveis relevantes; as fontes de dados possíveis são medições de campo, observações, detecção por sensoriamento remoto e entrevistas. O Reporte é o processo de comunicação formal dos resultados da avaliação, de acordo com formatos e de acordo com os padrões estabelecidos. Já a Verificação é o processo formal de checagem de relatórios e dados. O principal instrumento de MRV é o *inventário de emissões* - geralmente anual - que pode ser de um país, uma região, uma empresa, um conjunto de atividades.
- *Transparência e Participação*: processos que possibilitam uma melhor e maior inclusão das diversas camadas da sociedade na informação, no conhecimento e na tomada de decisão, particularmente para os desfavorecidos em termos de oportunidades, acesso a recursos e respeito aos direitos.
- *Justiça climática* é um conceito estrito e amplo. De forma ampla, Justiça é o tratamento imparcial e justo sem favoritismo ou discriminação em que cada pessoa é considerada de igual valor com igual oportunidade. A justiça se preocupa em garantir que as pessoas recebam o que lhes é devido, estabelecendo a forma como as pessoas são tratadas, muitas vezes com base na ética e nos valores da sociedade. A ética envolve questões de justiça e valor. A justiça está preocupada com o certo e o errado, a equidade e a justiça, e, em geral, com os direitos de que

são titulares as pessoas e os seres vivos. O valor é uma questão de benefício associado. Em sentido mais estrito, a Justiça Climática vincula desenvolvimento e direitos humanos para alcançar uma abordagem centrada no ser humano para abordar alterações climáticas, salvaguardando os direitos das pessoas mais vulneráveis e partilhando os encargos e benefícios das mudanças climáticas e seus impactos de forma equitativa e justa.

- *Igualdade*: princípio que atribui valor igual a todos os seres humanos, incluindo oportunidades iguais, direitos e obrigações, independentemente das origens. De maneira implícita, a desigualdade se refere a oportunidades e posições sociais desiguais e processos de discriminação dentro de um grupo ou sociedade, com base em gênero, classe, etnia, idade e (in)abilidade, muitas vezes produzidos por desenvolvimento desigual. Em termos de renda, a desigualdade refere-se às diferenças entre os que ganham mais e os mais baixos rendimentos dentro de um país e entre países.
- *Equidade*: princípio de ser justo e imparcial e uma base para entender como os impactos e as respostas às mudanças climáticas, incluindo custos e benefícios, são distribuídos na e pela sociedade de forma mais ou menos igual. Alinhada com ideias de igualdade e justiça, a equidade se refere à responsabilidade e distribuição de impactos e políticas climáticas em toda a sociedade, gerações e gênero, bem como no sentido de quem participa e controla os processos de tomada de decisão. A equidade distributiva se refere a consequências, resultados, custos e benefícios das ações ou políticas. No caso do clima, mudanças ou políticas climáticas para diferentes pessoas, lugares e países, incluindo aspectos de equidade de compartilhamento, encargos e benefícios para mitigação e adaptação. A equidade de gênero reconhece que as mulheres são frequentemente mais vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas e podem ficar em desvantagem no processo e nos resultados das políticas. Já a equidade intergeracional reconhece que os efeitos das emissões, vulnerabilidades e políticas passadas e presentes impõem custos e benefícios para pessoas no futuro e de diferentes faixas etárias.
- *Transição Justa*: conjunto de princípios, processos e práticas que visam garantir que nenhuma pessoa, trabalhadores, lugares, setores, países ou regiões sejam deixados para trás na transição de uma economia de alto carbono (baseada em combustíveis fósseis, dentre outros) para uma de baixo carbono. Ela enfatiza a necessidade de medidas direcionadas e proativas de governos, agências e autoridades para garantir que quaisquer impactos sociais, ambientais ou econômicos negativos das transições em toda a economia sejam minimizados, enquanto os benefícios são maximizados para aqueles afetados desproporcionalmente. Os princípios-chave de transições justas incluem respeito e dignidade para grupos vulneráveis; justiça no acesso e uso da energia, diálogo social e democracia, consulta com as partes interessadas relevantes; criação de empregos decentes; proteção social; e direitos no trabalho. A transição justa pode incluir justiça em energia, uso da terra, planejamento climático, processos de tomada de decisão, diversificação econômica baseada em investimentos de baixo carbono, programas de treinamento e retreinamento realistas que levem a trabalho decente, políticas específicas de gênero que promovam resultados equitativos, fomento da internacionalização, cooperação e

ações multilaterais coordenadas e a erradicação da pobreza. A transição justa pode ainda incorporar a reparação de danos passados e injustiças percebidas.

- *Neutralidade (net zero)*: apesar do objetivo - cientificamente indicado e pelos países assumido no Acordo de Paris dentro da Convenção do Clima - ser global, os sujeitos das políticas de *net zero* podem ser entidades como uma dada jurisdição local, uma empresa, ou uma dada atividade. Os instrumentos de mensuração, reporte e verificação (MRV) são os inventários de emissão e, em função destes e de suas premissas, a neutralidade pode ser avaliada apenas em termos de emissões *diretas* (chamada de *Escopo 1*) de gases, ou levando em conta também as emissões embutidas na produção de eletricidade utilizada (*Escopo 2*), ou ainda considerando todo o longo do ciclo de vida do produto ou serviço (*Escopo 3*). Os chamados compromissos *net zero* podem conter consideráveis limitações: a análise pode ser limitada a apenas algumas das emissões (caso da neutralidade de carbono, que considera somente o CO₂ e não os demais GEE), durante um período especificado (por exemplo a partir de 2030 e até 2050), somente às emissões para as quais o sujeito possui controle direto conforme metodologia e fronteiras do sistema (somente nos escritórios, somente nas operações dentro da fábrica, apenas na cidade ou numa dada região), considerando remoções em outros locais pela compra de créditos de carbono e outros tipos de compensação (em inglês *offsets*), ou ainda condicionadas a medidas tomadas por terceiros e outras conjunturas (se o governo central adotar e implementar políticas na área de energias renováveis e eliminar os combustíveis fósseis, ou se as negociações internacionais de clima por evoluírem ambiciosamente, por exemplo).

A ação climática é um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS ou em inglês *SDG*) da Organização das Nações Unidas - ONU. Atualmente um grande número de organizações governamentais e instituições financeiras desenvolveram maneiras de medir até que ponto uma corporação específica está alinhada com todos esses objetivos.

Nesse sentido, a chamada *governança ambiental, social e corporativa* (comumente chamada pelo seu acrônimo em inglês *ESG*) é uma abordagem que avalia os níveis de compromissos e responsabilidade com temas diversidade, equidade, inclusão e proteção ambiental. Visões críticas buscam verificar os efeitos obtidos por essas medidas, de até que ponto se tratam de ações efetivas e a partir de quando podem ser chamadas de maquiagem verde (em inglês, *greenwashing*). Exemplos estão por toda parte e não são difíceis de se identificar, bastando verificar qual é a ação pretendida em relação ao objetivo implícito de quem a promove.



Emissões de gases de efeito estufa inventariadas conforme Escopos 1 (diretas, dentro dos limites considerados), 2 (embutidas na eletricidade consumida) e 3 (indiretas, além dos limites). Elaboração própria com imagens de domínio público (Macrovector, 2022)



Co-benefícios: objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ONU Brasil, 2022)

Informação, Capacitação, Educação e Transferência de Tecnologia

Informações sobre o passado, estado atual ou futuro do sistema climático que são relevantes para mitigação, adaptação e gestão de risco climáticos. Esta pode ser adaptada ou co-produzida para contextos específicos, levando em conta as necessidades e valores de seus usuários. A geração e o adequado fornecimento de informações climáticas auxilia na tomada de decisões. A coordenação entre usuários e provedores de informações deve ser cientificamente embasada, de forma a oferecer um mecanismo de acesso eficaz que responda às crescentes necessidades.

A *Transferência de Tecnologia* envolve a disseminação e troca de conhecimentos, meios (*software*) e equipamentos (*hardware*) associados, bens e recursos financeiros entre as partes interessadas, visando à adaptação ou mitigação. O termo abrange tanto a difusão de tecnologias quanto a cooperação tecnológica entre e dentro dos países. O tema é muito sensível politicamente por vincular-se a patentes e a outras formas de propriedade industrial. Implantação é o ato de colocar a tecnologia em aplicação efetiva, e difusão de tecnologia é sua disseminação entre diferentes grupos de usuários e mercados ao longo do tempo. Sistemas de inovação envolvem instituições cujas atividades e interações geram e modificam novas tecnologias.

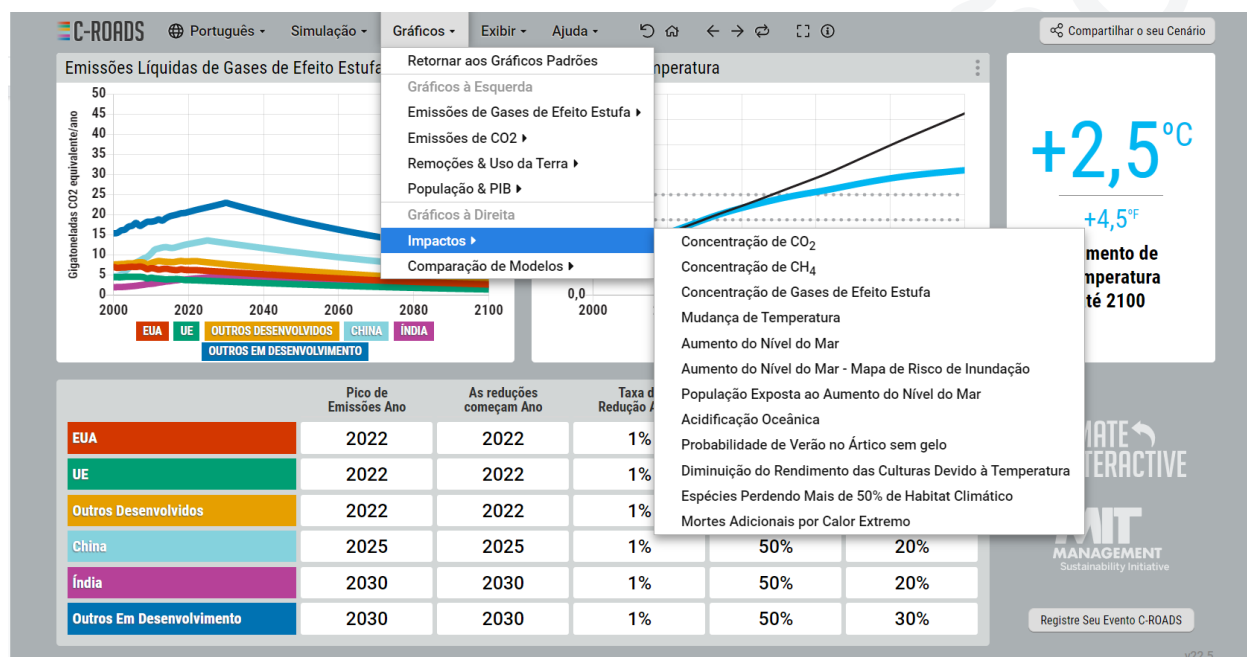
Capacitação é, a partir da informação, a prática de melhorar os pontos fortes e atributos e recursos disponíveis para um indivíduo, comunidade, sociedade ou organização para responder às mudanças. A capacitação institucional se refere à construção e ao fortalecimento de organizações individuais, bem como ao fornecimento de treinamento técnico e gerencial. Com isso, se apoiam e empoderam processos integrados de planejamento e tomada de decisão entre organizações e pessoas, se aprimora o capital social e se garante um ambiente propício que inclui cultura, valores e relações de poder. A capacitação em matéria climática amplia as possibilidades de resiliência, adaptação e mitigação das causas do aquecimento global.

A *Educação* integra informação e capacitação, explorando habilidades, valores, crenças, recursos e oportunidades, com isso possibilitando abordar, gerenciar e superar condições adversas no curto e médio prazos. No longo prazo, é o fator fundamental para a melhor transformação de nossa sociedade em um ambiente que com certeza irá mudar.

Um exercício simples

Após exercitarmos as noções de ciência do clima, adaptação e mitigação, aqui se proõe uma dinâmica de grupo que simula as *negociações climáticas*, que intrinsecamente envolvem todos os meios de implementação.

Para isso, propõe-se utilizar a plataforma interativa C-ROADS, ilustrada abaixo, que discute opções regionais e apresenta os impactos das medidas adotadas.



Simulação de impactos climáticos em função de medidas adotadas: plataforma C-ROADS (Climate Interactive, 2022)

Da mesma forma, os professores podem iniciar reflexões sobre quem deve fazer o que, onde e quando. A partir daí, trazer da esfera das negociações às políticas nacionais e locais, explorando os meios de implementação expostos neste capítulo.

Mensagem final

As transformações pelas quais estamos passando trazem enormes desafios, mas seus resultados podem ser extremamente positivos.

As políticas climáticas envolvem aspectos de engenharia, economia, ciências ambientais, ciências políticas e ciências sociais. Além disso, a psicologia, as comunicações e a ética também desempenham um papel na formação das decisões individuais e coletivas. Assim, este tópico pode ser ensinado em praticamente qualquer disciplina, fazendo com que os estudantes se beneficiem de uma compreensão da ciência por trás dos aspectos políticos.

Nesse sentido, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, 2021) traz uma luz sobre as carreiras na chamada economia verde. Esta oferece milhões de novos empregos em todo o mundo, muitos dos quais sequer foram ainda criados. Decisões inteligentes sobre a educação, habilidades a se adquirir e experiências desejadas podem encaminhar o jovem para os empregos do futuro. Os que já estão numa dada trilha podem incorporar dimensões de sustentabilidade de forma a receber dividendos - não somente para o próprio futuro mas também para aqueles que o rodeiam. Garantir um emprego é importante, mas garantir um emprego que pode ajudar a transformar o futuro é crítico.

Algumas habilidades que podem gerar empregos competitivos e verdes:

- Nas Ciências, o mundo precisará de mais cientistas ambientais, cientistas de materiais, biólogos, bioquímicos, hidrólogos e outros especialistas para enfrentar desafios em campos como o planejamento do uso do solo, gerenciamento de ecossistemas, projeto de captura e sequestro de carbono, e tantos outros.
- Em Arquitetura e Planejamento, o mercado precisará de profissionais capazes de traduzir leis e regulamentos para seus clientes, além de atender à crescente demanda por projetos inovadores de edifícios, maximizando a eficiência e minimizando a pegada de seus impactos ambientais.
- Gerentes de habilidades e operacionais serão necessários para empresas, de forma a aumentar sua sustentabilidade e eficiência, fortalecendo suas estruturas, cadeias de suprimentos e sistemas de vendas e *marketing*.
- Engenharia e tecnologia verdes terão crescente procura, por meio de trabalhadores capacitados que possam projetar, instalar e manter turbinas eólicas, painéis solares, gerenciamento de resíduos, veículos elétricos e outras formas de mobilidade de baixa emissão.

- A Agricultura vai precisar de pessoas qualificadas em inteligência de clima, conservação, além das agriculturas urbana, orgânica e de precisão.
- O monitoramento e o acompanhamento dos impactos ambientais e humanos é cada vez mais essencial, seja ele feito por analistas, fiscais, técnicos, gerenciadores de emergências, oficiais de governo e tantos outros agentes.
- Desafios em Infraestrutura vão exigir especialistas em Sistemas para determinar fluxos de trabalho diante de mudanças nas condições, operações e ambientes, identificar indicadores de desempenho, estabelecer formas de correção e de melhoria, abordar aspectos de macroeconomia e análises de custo-oportunidade de longo prazo, bem como integrar a sustentabilidade no planejamento e execução de projetos ;
- Em inovação serão necessárias competências para a identificação, análise e resolução de problemas complexos, inclusive desenvolvendo novas tecnologias e induzindo novas políticas públicas;
- A Justiça trabalhará com a interseção dos direitos humanos e ambientais de forma mais importante do que nunca, na medida em que o mundo reconhece uma herança de injustiças raciais e sociais que contribuíram para a degradação da saúde humana e do meio ambiente; isso prescinde entender as mudanças políticas, processos judiciais e a própria História, de forma a que erros não se repitam; ciências sociais, antropologia e política são campos que incorpora a dimensão ambiental.
- Professores e outros educadores deverão incorporar o ensino da economia verde em seus currículos e cursos, devendo ser treinados e treinados para aumentar a consciência e proficiência ambientais.

A pandemia de COVID-19, as recentes crises econômicas e os desastres ambientais que testemunhamos mostram claramente que é necessário evoluir além das formas antes praticadas. A sustentabilidade é um fator-chave para que isso ocorra. Para se identificar se o caminho a seguir vai nessa linha pode-se olhar para três aspectos: intenções, abordagem e resultados.

Com esse intuito, a presente obra se encerra com a resposta a perguntas frequentes e ferramentas de ensino para complementar - e nunca substituir - os currículos básicos.

A lista é dinâmica, a temática também. Espera-se que esta primeira edição passe por muitas revisões, atualizações e expansões.

Agradeço aqui pelo tempo que os leitores dedicaram a esta proposta.

Perguntas Frequentes

O aquecimento global é causado pelo homem?

Avançados sistemas computacionais e de monitoramento integrados oferecem robustez às evidências das causas humanas do aquecimento global, a ponto de estatisticamente esta afirmação beirar a certeza, refutando argumentos corretamente chamados de *negacionistas*. O clima é geralmente definido como tempo médio e, como tal, as mudanças climáticas e o clima estão interligados. As observações podem mostrar que houve mudanças no clima, e são as estatísticas de mudanças no clima ao longo do tempo que identificam as mudanças climáticas.

Como se explicam as ondas de frio se o planeta está aquecendo?

A explicação para uma onda de frio intensificada pelo aquecimento global é física: na medida em que o sistema terrestre contém mais energia - que foi absorvida do Sol. Mais energia no sistema causa maiores deslocamentos das massas de ar, empurrando o frio de regiões polares para outras latitudes. Sempre há extremos de calor e frio, embora sua frequência e intensidade mudem à medida que o clima muda.

Como os cientistas podem prever o clima daqui a 50 anos, enquanto não podem prever o tempo em algumas semanas a partir de agora?

A natureza caótica do clima o torna imprevisível além de alguns dias. Projetar mudanças no clima (ou seja, clima médio) devido a mudanças na composição atmosférica ou outros fatores é uma questão muito diferente e muito mais gerenciável. Por analogia, embora seja impossível prever a idade em que qualquer homem em particular morrerá, podemos dizer com grande confiança que a idade média de morte para homens nos países industrializados é cerca de 75 anos. Embora o tempo e o clima estejam intimamente relacionados, existem diferenças.

Por que as negociações de clima falharam até agora?

Simplificando a resposta de forma extrema, as negociações falharam por *falta de informação* - adequada, transparente e a todos disponibilizada. Isso certamente envolve a *educação*, dentre outros meios de implementação. A mudança climática adiciona complexidades à tomada de decisão pois inclui horizontes de longo prazo e afeta uma gama mais ampla de sistemas humanos e terrestres em comparação com muitas outras fontes de risco. A percepção das consequências das mudanças climáticas, do grande número de fatores envolvidos e da variedade dos campos de prática frequentemente leva a condições de paralisia, que por sua vez leva a resultados indesejáveis e irreversíveis. A falha nas negociações pode ser atribuída a vários fatores. Em primeiro lugar, a *falta de informação* (incluindo a informação deliberadamente distorcida, ou ainda a informação científica não

acessível) faz com que os riscos intuitivamente percebidos no processo de tomada de decisão não sejam alinhados com os riscos calculados e apontados pelos métodos científicos (ambientais, sociais, econômicos e geopolíticos). Em segundo lugar, a *ênfase dada a processos em detrimento dos resultados concretos* (“a boa notícia é que pelo menos é um começo”), causada pela aversão a riscos de curto prazo como perda de popularidade política. Em terceiro lugar, a dificuldade em se incorporarem questões *éticas* como equidade intergeracional (direitos das próximas gerações) e distribuição justa (tratamento desigual visando minimizar as desigualdades). A tomada de decisão em torno das mudanças climáticas em seus diferentes contextos tem sido objeto de diversos estudos. Estes incluem por exemplo aspectos culturais e comportamentais, e envolvem ampla geração e troca de conhecimento. Boas decisões surgem de processos nos quais as pessoas são explícitas sobre seus objetivos, considerando as opções e utilizando a melhor ciência disponível para entender as consequências potenciais e viabilizar sua implementação.

Por que controlamos o buraco na camada de ozônio mas não conseguimos fazer isso com o aquecimento global?

A *camada de ozônio* estratosférico está situada a 15-40 quilômetros da superfície terrestre e filtra a incidência de raios solares ultravioleta que aumentam a incidência de câncer de pele em humanos, além de afetar outros seres vivos. Nós estamos na troposfera, onde a mesma substância ozônio possui um efeito tóxico, de poluente local, não servindo de filtro solar. A camada de ozônio é afetada por gases industriais como os clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), que possuem importantes aplicações em refrigeração, solventes, espumas e controle de incêndios. Proposto em 1987, o Protocolo de Montreal (para Controle das Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio) obteve grande sucesso em sua implementação porque envolvia poucos fabricantes, interessados em substituir seus produtos por alternativos que eles mesmos forneciam. Houve assim, uma sinergia ambiental e comercial. Isso não ocorreu, pelo menos por enquanto, com a Convenção-Quadro das Nações Unidas para a Mudança do Clima, de 1992. Os gases de efeito estufa são emitidos por uma enorme gama de processos, de forma bastante difusa mas em enorme escala. Os combustíveis fósseis, o desmatamento e a pecuária são muito mais complexos do que uma dúzia de grandes indústrias. Soluções custo-efetivas estão surgindo (caso da energia solar), mas para obter os resultados ambientais desejáveis são necessárias medidas e políticas adicionais.

Gases de efeito estufa são poluentes?

Frequentemente nos deparamos com erros conceituais. Um bastante frequente é confundir o *monóxido de carbono* (CO, um gás tóxico e poluente local) com o *dióxido de carbono* (CO₂, um gás de efeito estufa). Também se confundem os *óxidos de nitrogênio* (NO₂ e NO, chamados de NO_x e poluentes locais) com o *óxido nítrico* (N₂O), um gás de efeito estufa. Gases de efeito estufa podem ser considerados poluentes, mas não se enquadram ainda na categoria dos *poluentes regulamentados ou de critério*. Estes são bem mais tóxicos e considerados nos processos de licenciamento ambiental: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂, da família dos NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (MP,

incluindo os finos MP_{10} e ultrafinos $MP_{2,5}$). Estes últimos não são gases e, conforme tipo e exposição, podem causar sérios danos à saúde humana.

Devo desistir?

Não há alternativa. Ambientalmente, pontos de não-retorno que já estão sendo atingidos aumentarão; este é o caso de perda de biodiversidade, aumento do nível do mar e acidificação dos oceanos, eventos extremos, desertificação e muitos outros. Socialmente, os impactos sobre populações (principalmente mas não apenas nos mais vulneráveis) leva a mortalidade e morbidade (doenças), migrações forçadas e conflitos de todo tipo. Economicamente há vários estudos, dos quais pode se destacar aqui o de uma grande resseguradora (Swiss RE, 2022), que avaliou as perdas no PIB global até 2050 em diferentes cenários: menos 4% se as metas do Acordo de Paris forem cumpridas e o aumento da temperatura média global for abaixo de $2^{\circ}C$; ou perda de 11% se outras ações de mitigação forem tomadas (aumento de $2^{\circ}C$); ou de 14% se forem tomadas algumas medidas mitigadoras (aumento de $2,6^{\circ}C$); ou ainda de 18% se forem mantidos os rumos atuais sem novas ações de mitigação (aumento de $3,2^{\circ}C$).

O que posso fazer?

Trabalhar com esse tema. Estudar o assunto. Invariavelmente nosso dia a dia irá se defrontar com as mudanças climáticas e com isso, além dos riscos, teremos oportunidades pela frente. Novas profissões serão criadas, carreiras antigas serão transformadas. As fronteiras do conhecimento estão se expandindo rapidamente e podem ser melhor exploradas. As formas de comunicação estão passando por uma revolução, trazendo desafios a estudantes e educadores. A resposta é simples: selecionar as fontes e se informar, evitar o pessimismo paralisante, incentivar e oferecer as melhores possibilidades às próximas gerações. Sem dúvida o processo de ensino é fundamental neste desafio e cabe aos nele envolvidos participar e liderar.

Como posso acompanhar os novos temas?

Perguntar sempre. Se informar. Apesar das ferramentas consideradas disruptivas - algumas apresentadas aqui - nada substitui a interação entre as pessoas e a educação formal. Isto posto, um desafio está no devido tratamento e assimilação da informação. Hoje em dia o acesso à comunicação se tornou mais democrático, mas longe de ser nivelado. A dificuldade está em saber filtrar. Não há uma fórmula única para isso, mas uma sugestão é a que se segue. Em primeiro lugar, deparando-se com algo novo, tentar identificar a fonte de informação - principalmente se forem repasses de mídias sociais. Pesquisar quem forneceu a informação, para quem trabalha. Como é pago, o que escreveu ou falou no passado. Não retransmitir conteúdo duvidoso (potenciais *fake news*) e ter cautela com materiais que possam ser considerados hostis (muitas vezes com conotações oportunistas, político-partidárias). Desconfiar sempre, mas não tirar conclusões precipitadas. Procurar no *Google* ou em outro grande

mecanismo de busca da Internet por palavras-chaves ou frases que tenham sido identificadas na narrativa. O Google Imagens oferece uma rápida visão geral dos temas e pode dar pistas de fontes de informação. Páginas em português são mais fáceis de ler, mas se possível é bom checar nas páginas em inglês, em geral mais completas. Mecanismos de tradução são interessantes, sempre tomando os devidos cuidados. Leia com muito cuidado páginas comerciais (.com), pesquisando a origem da informação e potenciais interesses envolvidos. Páginas não-governamentais e não-comerciais (.org) podem ser excelentes fontes de informação, recomendando-se sempre ler uma seção chamada *About* (ou *Sobre*). A *Wikipedia* substitui em certo grau as antigas enciclopédias, oferecendo resumos, definições, ilustrações e mais referências. Priorizados pelo IPCC, artigos científicos (revisados por pares ou *peer-reviewed*) se distinguem da chamada literatura *cinza* (menos confiável) e podem ser encontrados pelo *Google Scholar* (Acadêmico).

Como posso levar esses assuntos aos alunos?

Projetos eficazes podem ser propostos para diferentes disciplinas. Por exemplo, em Ciências (ou Física), como a energia é produzida, a partir de onde, em que quantidades. Em Estudos Sociais (ou Ciência Política) pode-se perguntar como os hábitos de consumo variam conforme as diferentes culturas, ou como são tomadas as decisões pelos governos que alteram esses padrões.. Em Matemática (ou Economia), cálculos de custos baseados em contas de energia ou água, ou discussão sobre os fatores incluídos nos preços, ou ainda formas de inclusão de externalidades como impactos socioambientais. Em Biologia, pode-se perguntar como os impactos sobre os ecossistemas afetam os seres humanos, quais impactos são esses e de onde vêm. Em dinâmicas de grupo, debater como as decisões sobre Clima estão na raiz das soluções para muitos desafios de nossa sociedade. Tópicos como a crescente demanda por recursos naturais, a necessidade de fontes de energia limpas e sustentáveis, a importância da inclusão e da equidade, Junto com ferramentas interativas e partindo da premissa de se adequar sempre aos currículos necessários, estes são métodos possíveis para capacitar os alunos a pensar em maneiras de resolver alguns de nossos desafios atuais.

Ferramentas de Ensino

Para iniciar

1. Jacobi P *et al*, 2021. **Temas atuais em mudanças climáticas para os ensinos fundamental e médio**. Portal de Livros Abertos da USP,
<http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/315>
2. Grandisoli E *et al*, 2021. **Novos Temas em Emergência Climática para os Ensinos Fundamental e Médio**. Portal de Livros Abertos da USP,
<http://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/711>
3. ICLEI, 2016. **Guia de ação local pelo clima**. Programa Cidades Sustentáveis,
<https://americadosul.iclei.org/documentos/guia-de-acao-local-pelo-clima> .
4. Lucon O e Azzari R, 2022. **Plataformas Interativas sobre Mudanças Climáticas. Participe! 18/05/2022**. SIMA-SP,
<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/educacaoambiental/videos/participe-plataformas-interativas-sobre-mudancas-climaticas/>
5. INPE, 2022. **Vídeos Educativos**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais,
<https://www.youtube.com/user/INPEvideoseduc/videos>

Estágios intermediários

6. NASA, 2022. **Climate Change Vital Signs**, <https://climate.nasa.gov/vital-signs>
Com ampla biblioteca de fácil entendimento, vídeos em inglês legendáveis em português,
https://www.youtube.com/channel/UCP_hZt43bbGGf9ah6ATOVeg, material infantil em inglês
<https://climatekids.nasa.gov/> ,galerias interativas
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide> , experimentos
<https://www.jpl.nasa.gov/edu/teach/> ,
<https://www.jpl.nasa.gov/edu/learn/project/how-warming-water-causes-sea-level-rise/>
7. UN, 2022. **Naciones Unidas Acción sobre el Clima / UN Climate Change**,
<https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
Informações sobre a ciência do clima, negociações internacionais, finanças e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, com vídeos em espanhol

8. UNESCO, 2022. **Office for Climate Education** , <https://www.oce.global/en>
Recursos multimídia em inglês e espanhol para professores
9. ACE, 2022. **Our Climate Our Future**. Action for the Climate Emergency, <https://ourclimateourfuture.org/>
Vídeos em inglês legendáveis em português e outros recursos educacionais,
10. CEMADEN, 2022. **Educação**,
<http://educacao.cemaden.gov.br/site/activity/ODAwMDAwMDAwNjc=>
Rede de escolas e comunidades na prevenção de riscos de desastres
11. IBGE, 2022. **Educa**,
<https://educa.ibge.gov.br/professores/educa-atividades/17613-os-tipos-de-clima-no-brasil.html>
Portal do IBGE voltado para a educação: com conteúdos atualizados e lúdicos sobre o Brasil
12. Khan Academy, 2022. **Science**, <https://pt.khanacademy.org/science>
Um projeto de ensino inovador, com versão em português

Estágios mais avançados

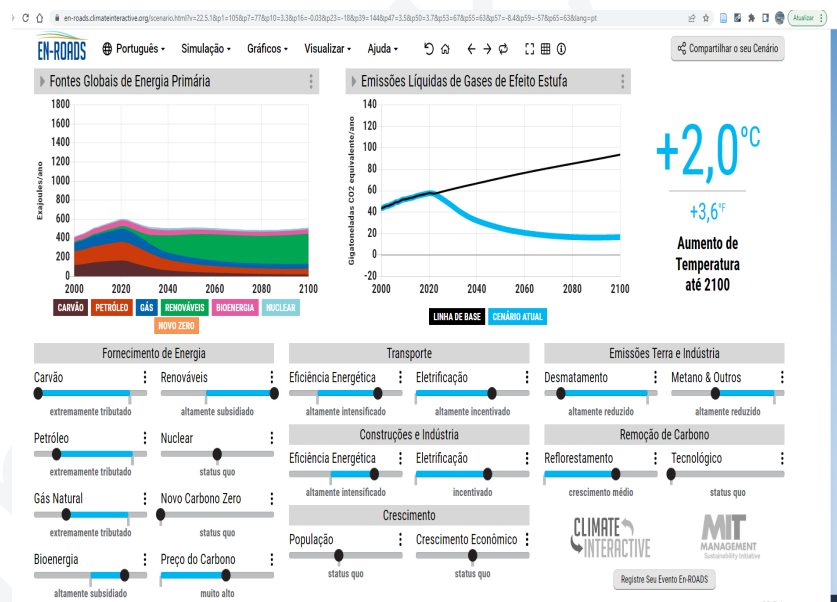
13. IPCC, 2022. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU, <https://www.ipcc.ch/>
14. MCTI, 2022. **Clima**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/index.html>
15. PBMC, 2022. **Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas**
<http://www.pbmc.coppe.ufri.br/index.php/pt/publicacoes/relatorios-pbmc>
16. UNEP, 2022. **GEO6 Panorama Ambiental Global - Avaliação Regional da América Latina e Caribe**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente,
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7659/geo-6_regional_assessment_LatinAmerica_Portuguese.pdf?sequence=3&isAllowed=y
17. OC, 2022. **Observatório do Clima**. <https://www.oc.eco.br/publicacoes/>
Publicações atuais sobre as políticas de clima no país e no mundo.

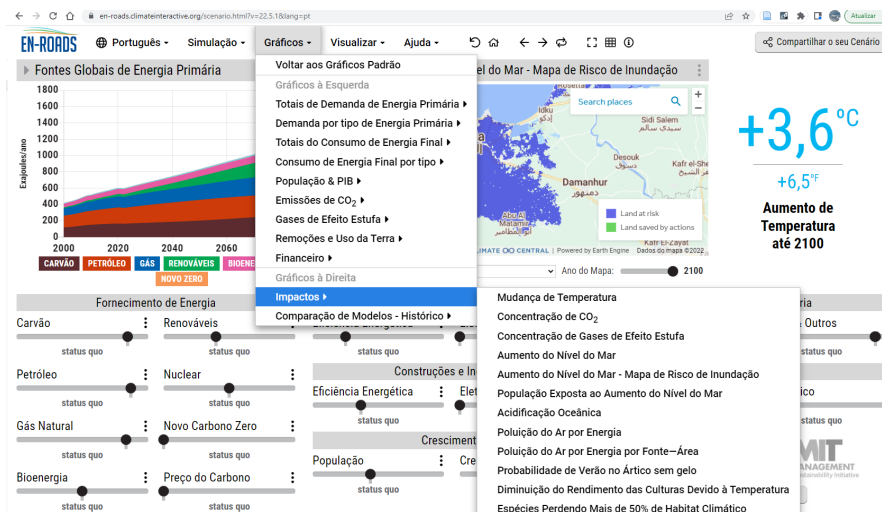
18. GHG Protocol Brasil, 2022. **Programa Brasileiro GHG Protocol**,
<https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>
Metodologia e treinamentos para inventários de emissões

Plataformas interativas

A lista a seguir apresenta recursos disponíveis na Internet que podem auxiliar nas aulas e trabalhos relacionados tanto às Mudanças Climáticas quanto a temas intimamente relacionados como recursos naturais, pressões humanas e governança. Para orientação apenas, cada um acompanha um número de estrelas (*), classificação subjetiva baseada na facilidade de uso.

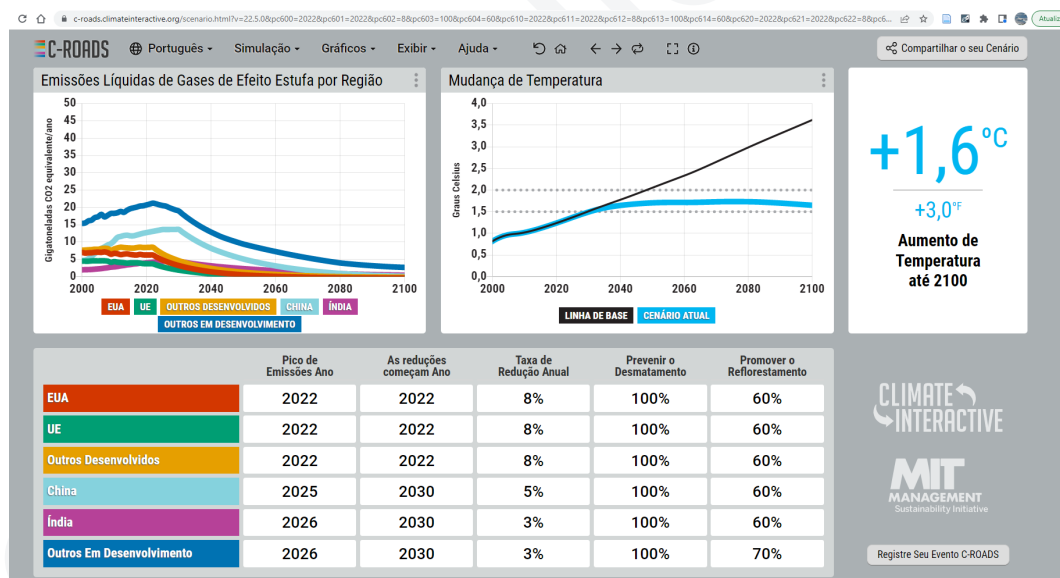
19. ***** EN-ROADS.





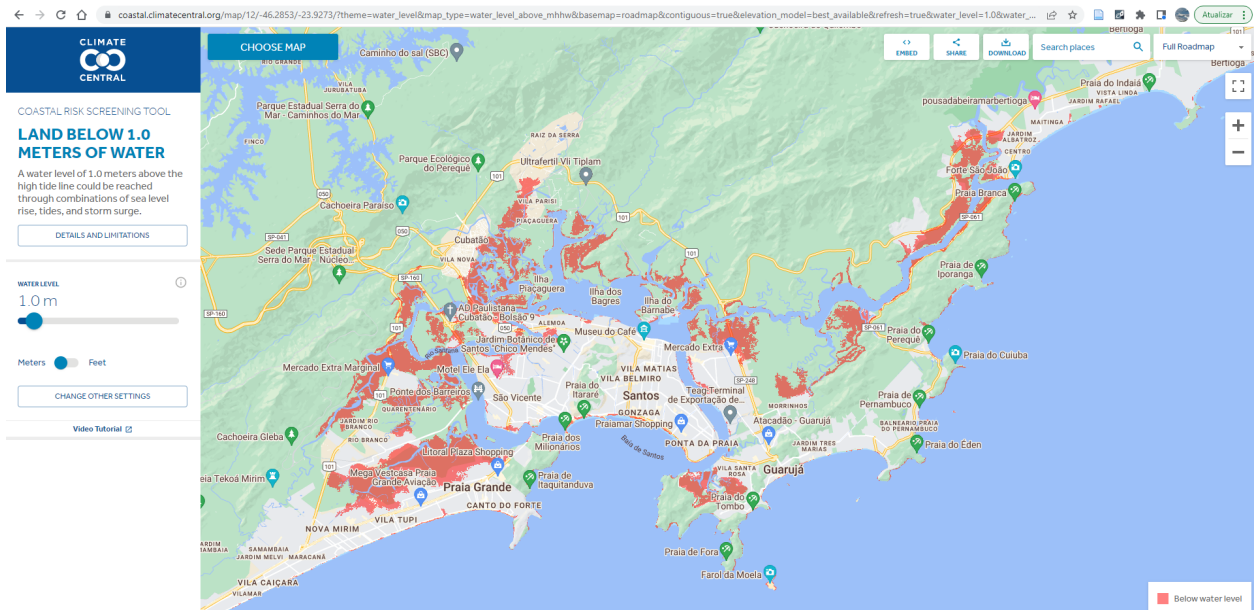
O EN-ROADS pode ser apresentado em português e possui fácil interatividade. Simula políticas globais, mudanças tecnológicas e efeitos no aumento da temperatura, avanço do nível do mar e outros. Disponível em <https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html>

20. **** C-ROADS.



Com a opção de idioma português e fácil interatividade, o C-ROADS simula um painel de negociações entre grupos de países para atingir os objetivos de redução da temperatura média no planeta. Disponível em <https://www.climateinteractive.org/c-roads/>

21. **** CLIMATE CENTRAL.



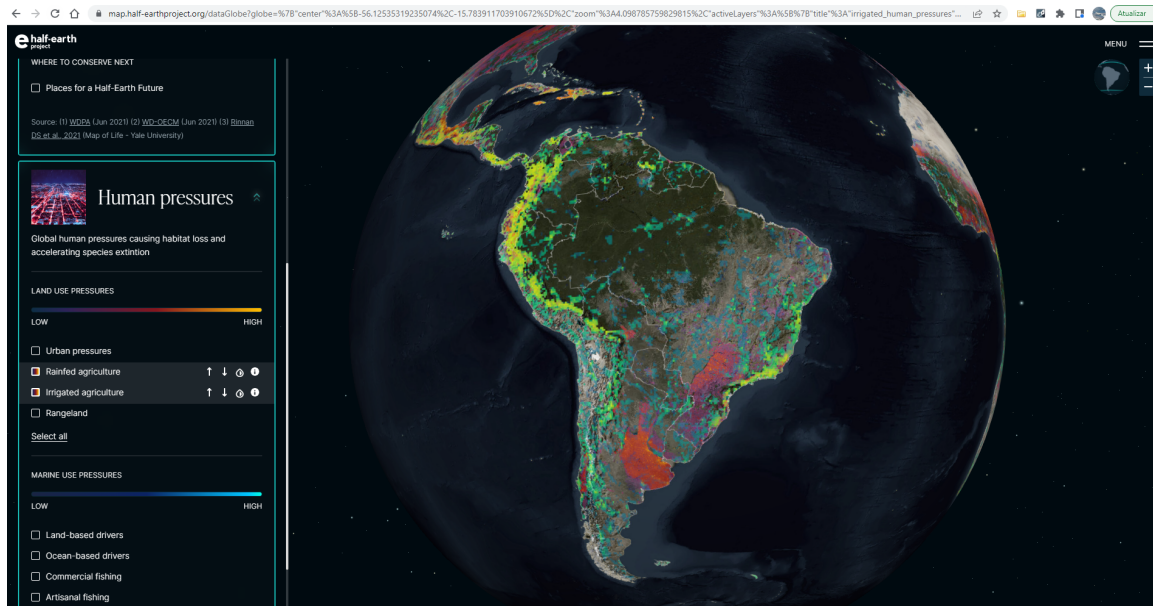
Em inglês, a plataforma mostra mapas de simulação do avanço do nível do mar em todo o mundo e pode ser encontrada em <https://coastal.climatecentral.org/>

22. **** NATURE MAP EXPLORER



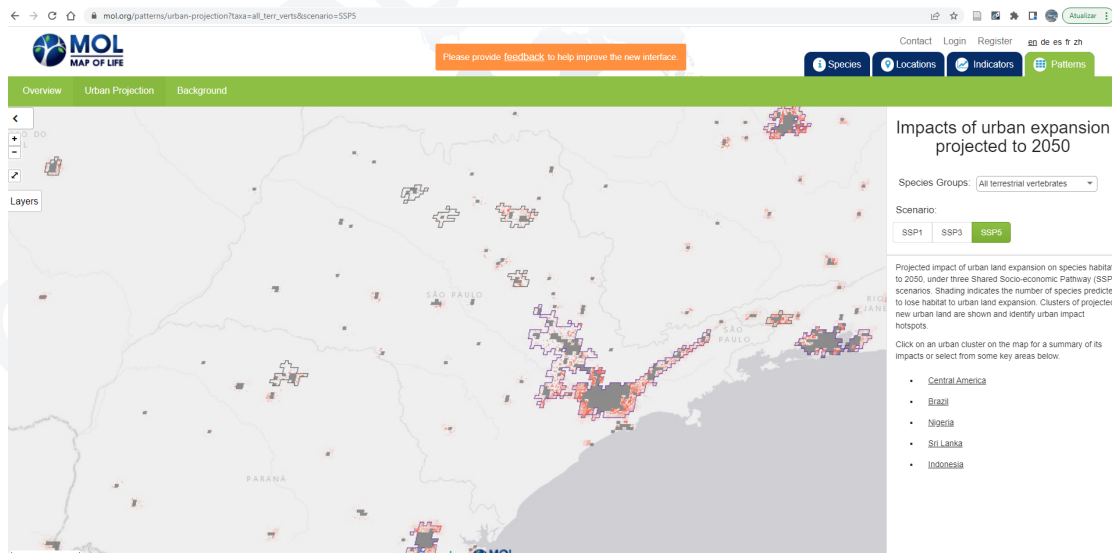
Em inglês, mostra mapas de tipos de habitat, vegetação natural, impactos humanos em florestas, biodiversidade, densidade de carbono na biomassa, oferta de água limpa e áreas significativas para conservação. Está em <https://explorer.naturemap.earth/map>

23. ** HALF EARTH MAP



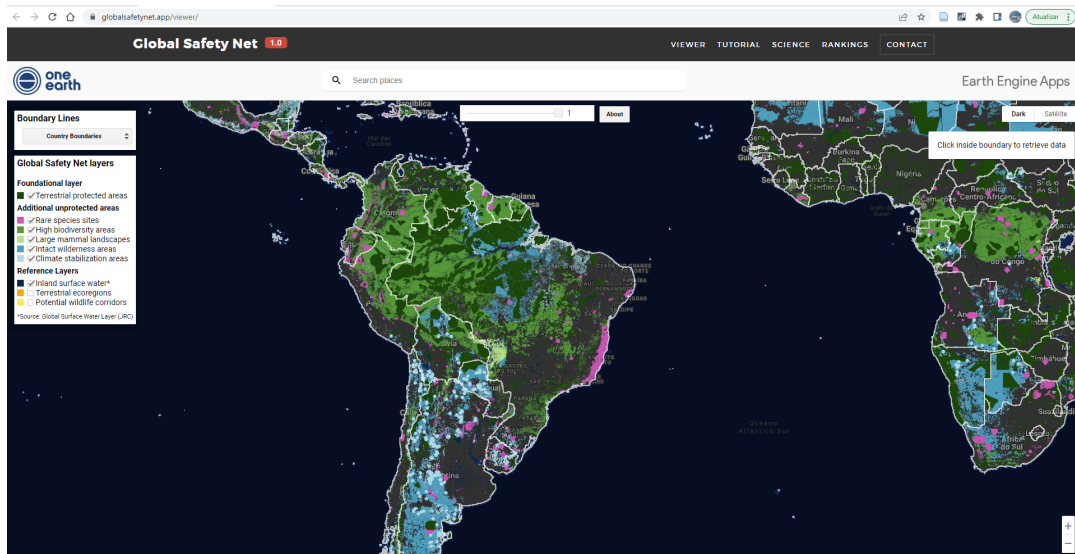
Em inglês, mostra mapas de biodiversidade, proteção e pressões humanas em <https://map.half-earthproject.org>

24. ** MOL MAP of LIFE.



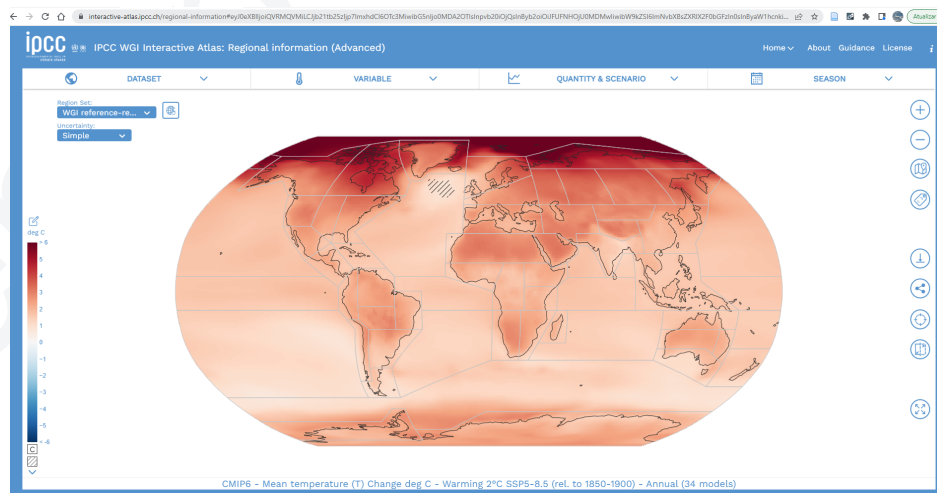
Também em inglês, apresenta biodiversidade, expansão urbana e outras pressões humanas. Está em <https://mol.org/>

25. * * GLOBAL SAFETY NET



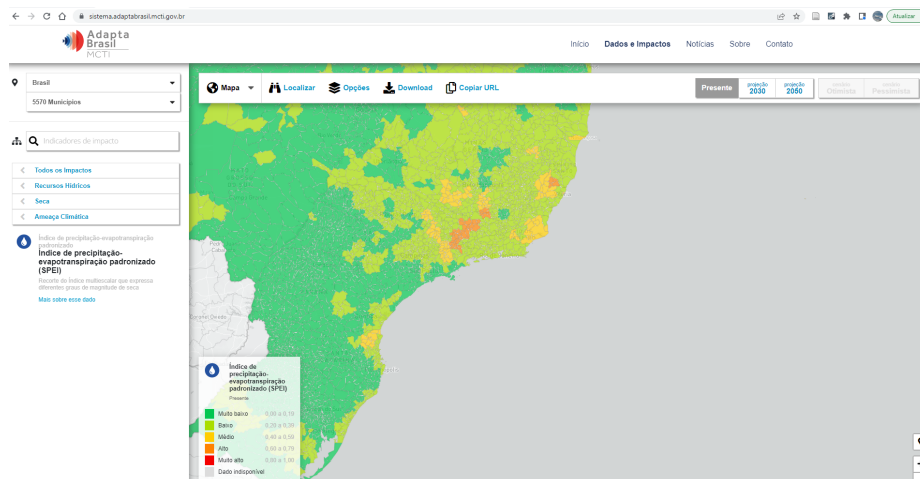
Em inglês, apresenta territórios protegidos no planeta e pode ser acessada em <https://www.globalsafetynet.app/viewer/>

26. * IPCC WGI INTERACTIVE ATLAS



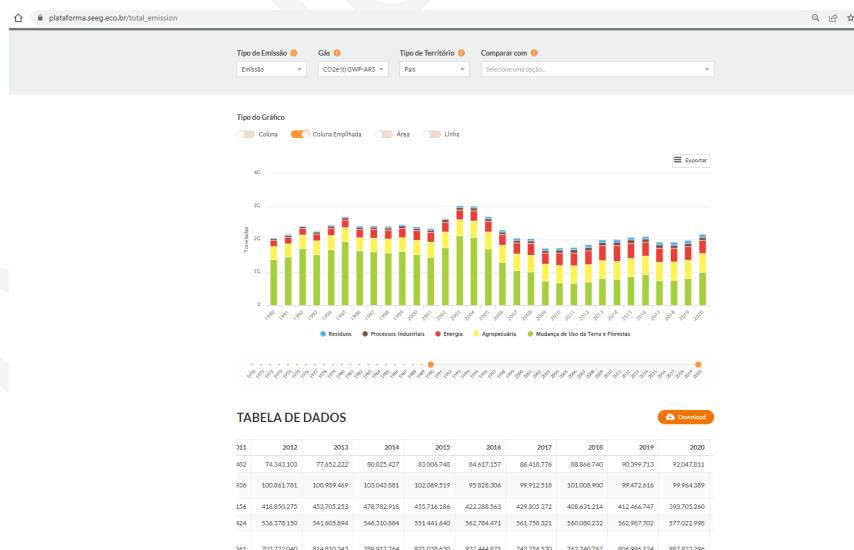
Em inglês, o Atlas mundial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas traz diversos modelos e simulações climáticas segundo vários cenários para estudantes mais avançados. Está em <https://interactive-atlas.ipcc.ch>

29. * ADAPTA BRASIL MCTI



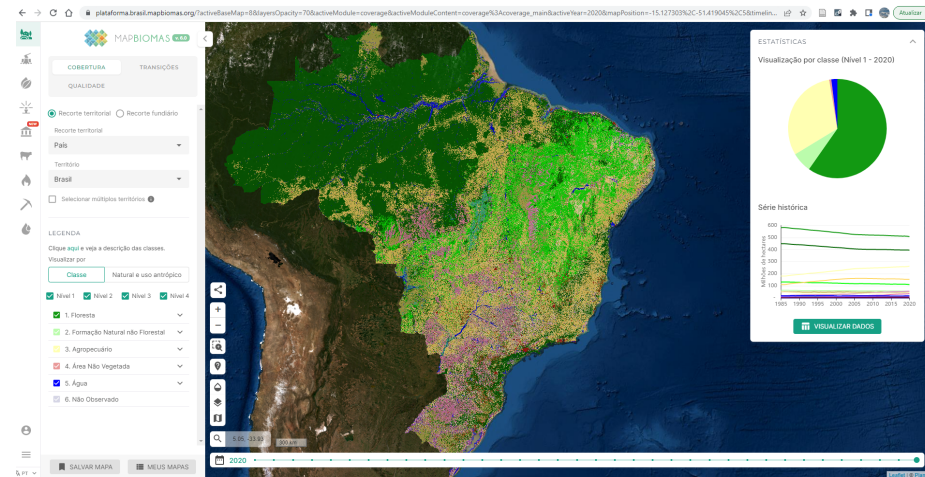
Voltada às ações de Adaptação, a Plataforma unificada para índices e Indicadores de risco de impactos das mudanças climáticas no Brasil (Recursos Hídricos, Segurança Alimentar, Segurança Energética, Saúde e Infraestrutura Portuária) está em <https://adaptabrasil.mcti.gov.br/>

30. * SEEG



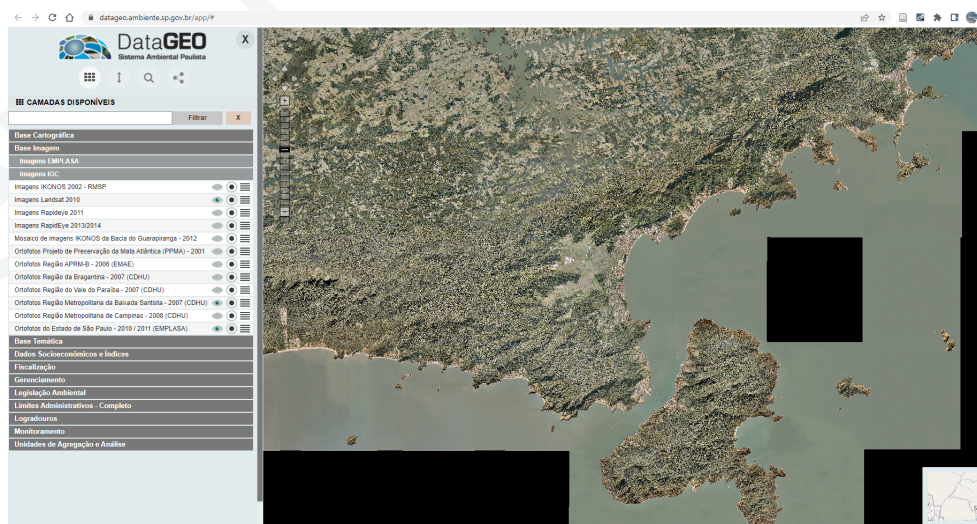
O Observatório do Clima e entidades parceiras desenvolveram e disponibilizam sem nenhum custo o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. É hoje o sistema mais completo e atualizado para estatísticas e estimativas de emissões, com infográficos, calculadoras, subdivisões por setor e vários subsetores, por gás, estado e município. Recomendável para estudantes mais avançados, está em <https://seeg.eco.br/>

31. * MAPBIOMAS



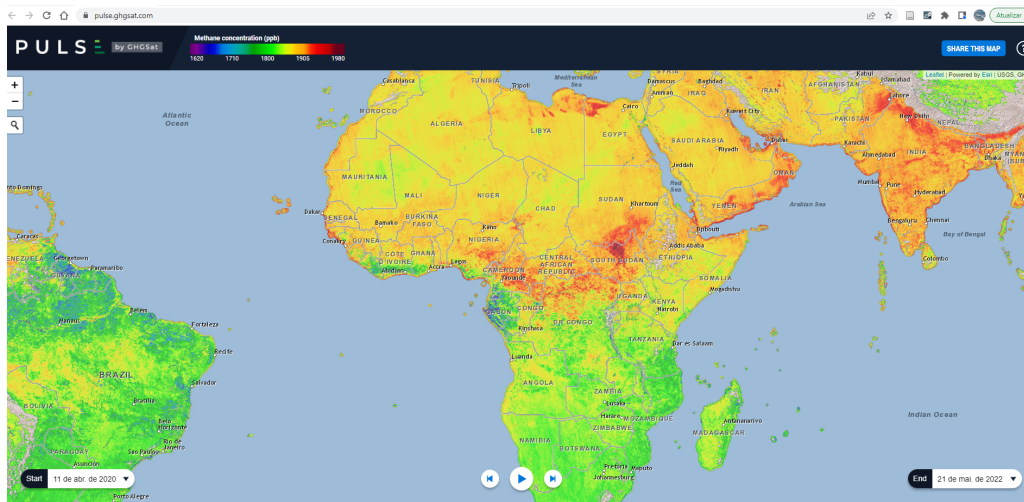
O Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil - MAPBIOMAS é uma rede colaborativa formada por ONGs, universidades e *startups* de tecnologia, que revela as transformações do território brasileiro, por meio da ciência, tornando acessível o conhecimento sobre o uso da terra, a fim de buscar a conservação e combater as mudanças climáticas. Produz mapeamento anual da cobertura e uso da terra e monitora a superfície de água e cicatrizes de fogo. Está em <https://mapbiomas.org/>

32. * DATAGEO SP



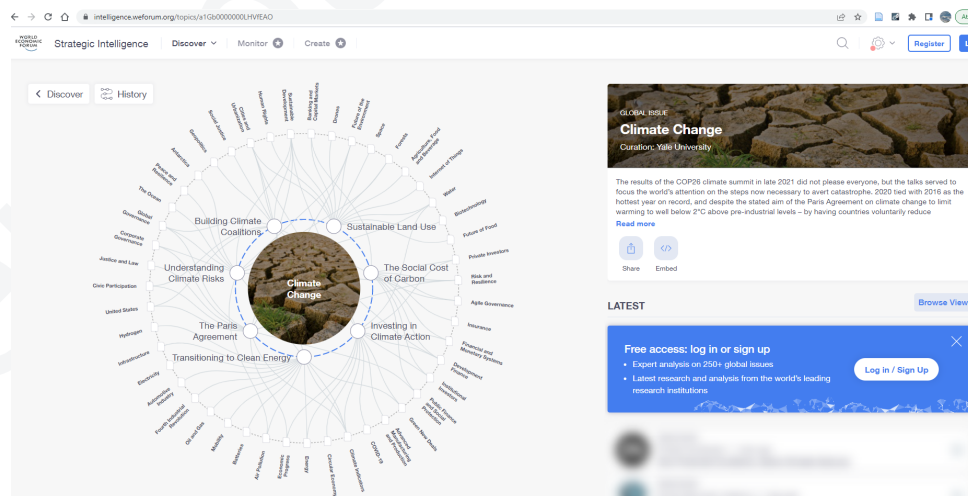
A base temática de planejamento ambiental do do território paulista pode ser encontrada em <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app/#>

33. * PULSE



O PULSE realiza monitoramento por satélite em tempo real das concentrações do gás metano no planeta. A parte gratuita está em <https://pulse.ghgsat.com/>

34. * World Economic Forum Strategic Intelligence



Bem mais complexa e em inglês, a plataforma apresenta relações entre temas de conhecimento, incluindo Mudanças Climáticas, relevantes para a economia mundial. Pode ser encontrada em <https://intelligence.weforum.org/topics/a1Gb0000000LPFFFAO?tab=publications>

Referências

1. Catalani M, 2022. Noções de Meteorologia. Colégio Objetivo <https://www.objetivo.br/conteudo.asp?ref=contF&id=7258>
2. Climate Interactive, 2022. Plataformas EN-ROADS e C-ROADS, <https://www.climateinteractive.org>
3. EPA, 2022. Overview of greenhouse gases. United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
4. GFDL, 2022. Aerosols and particles. Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Princeton University, <https://www.gfdl.noaa.gov/aerosols-and-climate/>
5. Goldemberg J, Lucon O, 2009. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. São Paulo, EDUSP
6. IBGE, 2020, Climas do Brasil, IBGE Educa <https://educa.ibge.gov.br/professores/jovens/conheca-o-brasil/territorio/20644-clima.html>
7. IPCC, 2007. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis, https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1
8. IPCC, 2014. Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>
9. IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
10. IPCC, 2022. Impacts, Vulnerability and Adaptation, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
11. IPCC, 2022. Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
12. Macrovector, 2022. Banco de imagens, <https://www.freepik.com/>
13. MME, 2022. Balanço Energético Nacional, ano-base 2021. Ministério de Minas e Energia, www.mme.gov.br
14. NASA, 2012. Global Climate Change. Vital Signs of the Planet, <https://climate.nasa.gov/causes/> (arquivo em português em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inter%C3%A7%C3%A3o_da_radia%C3%A7%C3%A3o_solar_com_a_atmosfera_terrestre_e_os_gases_de_efeito_estufa.png)
15. NOAA, 2009. The Essential Principles of Climate Literacy. Teaching Climate, <https://www.climate.gov/teaching/climate>
16. ONU Brasil, 2022. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil, <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
17. Parker W, 2018. Climate Science. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.)
18. Pixhere, 2022. Santorini Greece. Creative Commons License, <https://pxhere.com/en/photo/945297>
19. SEEG, 2022. Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito estufa no Brasil em 2020, <http://seeg.eco.br/infografico>
20. Swiss Re, 2022. World economy set to lose up to 18% GDP from climate change if no action taken, reveals Swiss Re Institute's stress-test analysis, <https://www.swissre.com/media/press-release/nr-20210422-economics-of-climate-change-risks.html>
21. UCAR, 2022. Center for Science Education, 2022. Albedo and Climate. National Center for Atmospheric Research, <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/albedo-and-climate>
22. UNEP, 2021. GEO6 for Youth United Nations Environment Programme, <https://www.unep.org/pt-br/resources/geo-6-para-jovens>
23. Weart S. The Discovery of global warming. American Institute of Physics, <https://history.aip.org/climate/index.htm>
24. WRI, 2022. Climate Watch. World Resources Institute, <https://www.wri.org/data/cait-climate-data-explorer>



Sobre o autor

Oswaldo Lucon é assessor em Mudanças Climáticas da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA-SP) e trabalha no tema desde 1992. Desde 1996 é autor do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas, contemplado com o Prêmio Nobel da Paz em 2007. Com diversas publicações no Brasil e no exterior, é professor colaborador do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP) desde 2002 e foi professor visitante na Universidade do Texas em Austin em 2011. Foi Coordenador Executivo do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas em 2019-2022.

<https://orcid.org/0000-0001-7154-5022>

<http://lattes.cnpq.br/4515741266378988>

ISBN ...

doi ...

Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e autoria e respeitando a Licença Creative Commons indicada (CC BY). As imagens de terceiros aqui reproduzidas cumprem a determinação expressa de citação de suas fontes. As fotos de capa e contracapa são de própria autoria (Marsden Rock, Newcastle Upon Tyne, Reino Unido, e Praia das Toninhas, Ubatuba, Brasil).

