

Aula 16b - Balanço de energia e o Efeito Estufa

Professor: Emílio Graciliano Ferreira Mercuri, D.Sc.
Departamento de Engenharia Ambiental - DEA,
Universidade Federal do Paraná - UFPR
emiliomercuri@gmail.com

Nas aulas passadas foi estudamos o fluxo de massa e energia em reatores (batelada, pistão e de CSTRs). Vamos expandir a análise para o meio ambiente, começando por um modelo para estudar o Efeito Estufa.

1 Balanço de energia no planeta Terra

Vamos aplicar a 1ª lei da termodinâmica para uma fina camada da crosta terrestre Terra (casca delimitada pela linha pontilhada azul) supondo que não existisse atmosfera.

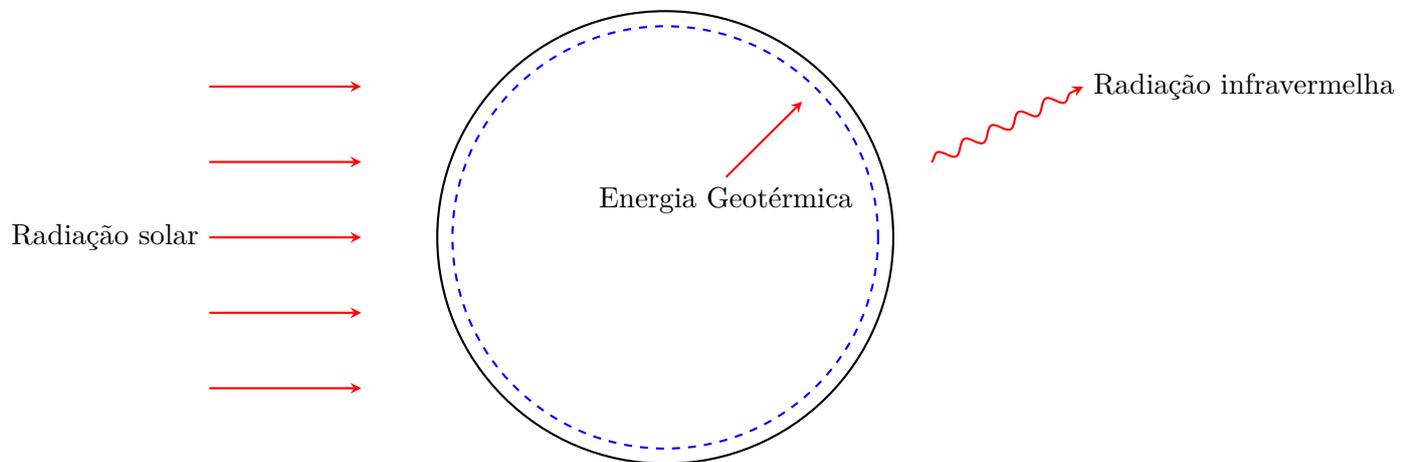


Figura 1: Planeta Terra

A entrada de energia é dada pela radiação solar (radiação de onda curta) que chega na Terra. A saída de energia ocorre pela radiação infravermelha (radiação de onda longa) que sai da Terra. O sistema que está sendo considerado é uma camada de poucos metros na superfície terrestre ou alguns quilômetros no oceano. O calor associado à energia geotérmica, proveniente do decaimento do urânio no núcleo da Terra, é desprezível em comparação às radiações solar e infravermelha para cálculos climáticos de caráter global.

Como hipóteses simplificadoras, considera-se:

1. Negligenciar o calor geotérmico
2. Temperatura uniforme em toda a crosta terrestre.
3. Estado estacionário.

A simplificação 2 não é realística, há diferenças sensíveis nas temperaturas do Equador até os polos, porém estamos buscando a temperatura média do planeta, então é uma hipótese razoável.

2 Leis de radiação

2.1 Radiação de corpo negro

A radiação do corpo negro é a radiação eletromagnética e térmica emitida por um corpo negro (um corpo opaco e não reflexivo idealizado) considerando que ele esteja em equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Possui um espectro específico de comprimentos de onda que depende apenas da temperatura do corpo, que é assumida, para fins de cálculos e teoria, como uniforme e constante.

A intensidade espectral da radiação do corpo negro atinge o pico em uma frequência que aumenta com a temperatura do corpo emissor:

- objetos em temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) emitem radiação com intensidade de pico no infravermelho (ver Figura abaixo)¹
- a radiação dos filamentos da torradeira e da lâmpada (cerca de 700 K e 2.000 K, respectivamente) também atingem o pico no infravermelho, embora seus espectros se estendam progressivamente para o visível.
- a superfície do Sol (6.000 K) emite radiação do corpo negro que atinge o pico no centro da faixa visível.

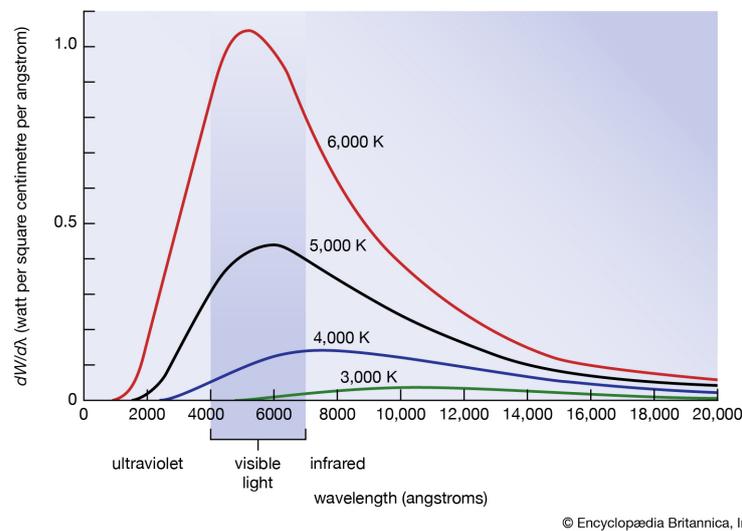


Figura 2: Intensidade de radiação emitida, temperatura do corpo emissor e comprimentos de onda.

Embora planetas e estrelas não estejam em equilíbrio térmico com seus arredores e não sejam corpos negros perfeitos, a radiação do corpo negro é usada como uma primeira aproximação para a energia que emitem. A radiação térmica emitida espontaneamente por muitos objetos comuns pode ser aproximada como radiação do corpo negro.

Observe na Figura 2 que quanto maior a temperatura de um corpo:

1. maior é a quantidade de radiação que é emitida em qualquer comprimento de onda.
2. maior é a radiação emitida em todo o espectro de comprimentos de onda (área abaixo da curva).
3. o pico da radiação é deslocado para a esquerda.

2.2 Lei de Wien

A lei de Wien é a lei da física que relaciona o comprimento de onda onde se situa a máxima emissão de radiação eletromagnética de corpo negro e sua temperatura.

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T(\text{K})} \quad (1)$$

sendo que λ_{\max} é o comprimento de onda (em micrômetros) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima e T é a temperatura em Kelvin.

Na Figura 2 é possível visualizar que a luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 micrômetros do espectro de comprimentos de onda.

¹Angstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$



Exemplo: Calcule o comprimento de onda (em micrômetros) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

Para o Sol:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{6000} \approx 0,48 \mu\text{m} \quad (2)$$

ou seja, aproximadamente no centro do espectro da luz visível ao olho humano. **Perguntas retóricas:** isso é apenas um acidente? Seria uma coincidência?

Para a Terra:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{288} \approx 10,0 \mu\text{m} \quad (3)$$

ou seja, o pico da radiação emitida pela Terra está no espectro do infravermelho.

2.3 Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann descreve a potência irradiada de um corpo negro em termos de temperatura. Especificamente, a lei de Stefan-Boltzmann declara que a energia total E irradiada por unidade de superfície de um corpo negro em todos os comprimentos de onda por unidade de tempo (também conhecida como emissão radiante do corpo) é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica T do corpo negro.

$$E = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \sigma T^4 \quad (4)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67037... \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Um corpo que não absorve toda a radiação incidente (também chamado de corpo cinza) emite menos energia total que um corpo negro e é caracterizado por uma emissividade $\varepsilon < 1$:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (5)$$

2.4 Radiação interagindo com a Terra

A radiação emitida pelo Sol que chega na Terra (pode ser obtida pela lei do inverso do quadrado da distância) é chamada de Constante Solar S , ver Figura 3.

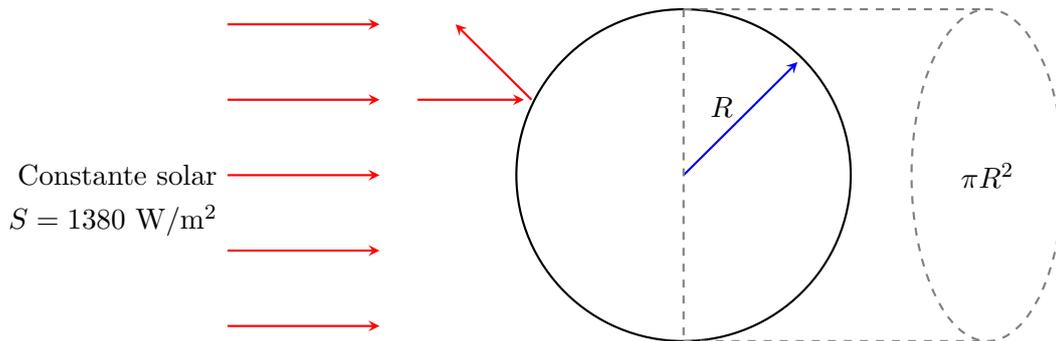


Figura 3: Radiação interceptada

A radiação interceptada pode ser encontrada usando a projeção da sombra da radiação que atinge a Terra:

$$\text{Radiação interceptada} = S\pi R^2 \quad (6)$$

Parte da radiação que atinge o nosso planeta é refletida. O albedo a é a propriedade física que representa a refletividade média de uma superfície. O albedo da Terra da terra é aproximadamente 0,33 (33% da energia que atinge a superfície é refletida), ou seja, $S\pi R^2 a$ representa a radiação que é refletida.

A radiação absorvida pelo nosso planeta é:

$$\text{Radiação absorvida} = S\pi R^2(1 - a) \quad (7)$$

A radiação emitida pela superfície da Terra (considerando que é um corpo negro) pode ser encontrada pela lei de Stefan-Boltzmann. A área da superfície de uma esfera é $A_{\text{esfera}} = 4\pi R^2$.

$$\text{Radiação emitida} = A_{\text{esfera}}\sigma T^4 = 4\pi R^2\sigma T^4 \quad (8)$$

2.4.1 Hipótese do Estado Estacionário (regime permanente)

Considerando a hipótese do estado estacionário (regime permanente). O balanço da radiação emitida (em Watts) e radiação absorvida (em Watts) é:

$$\text{Radiação absorvida} = \text{Radiação emitida} \quad (9)$$

$$S\pi R^2(1 - a) = 4\pi R^2\sigma T^4 \quad (10)$$

$$T^4 = \frac{S(1 - a)}{4\sigma} \quad (11)$$

$$T = \left[\frac{S(1 - a)}{4\sigma} \right]^{1/4} \quad (12)$$

Para a Terra:

$$T = \left[\frac{1380(1 - 0,33)}{4(5,67037 \times 10^{-8})} \right]^{1/4} = 252,6798584 \approx 252 \text{ K} = -21^\circ\text{C} \quad (13)$$

Entretanto, a temperatura média da Terra é 15°C ! Porque há essa diferença?

3 O efeito estufa

A Terra recebe praticamente toda a energia que precisa do sol. A energia vem do Sol como radiação eletromagnética de ondas curtas. A atmosfera é principalmente transparente à radiação solar de ondas curtas e a radiação pode viajar para a superfície, onde é absorvida. A superfície emite radiação eletromagnética de onda longa, isto é, no comprimento de onda da radiação do infravermelho (radiação térmica). A atmosfera não é transparente à radiação térmica, mas a radiação térmica é absorvida pelos gases de efeito estufa na atmosfera, que por sua vez a emitem ainda mais. Portanto, além da radiação de ondas curtas do Sol, a radiação térmica da atmosfera também aquece a superfície da Terra. A atmosfera age como um cobertor que aquece nosso planeta. Graças a esse efeito estufa natural, a temperatura da superfície da Terra é em média $+15^{\circ}\text{C}$, que é 36°C mais quente do que seria sem o efeito estufa (-21°C).

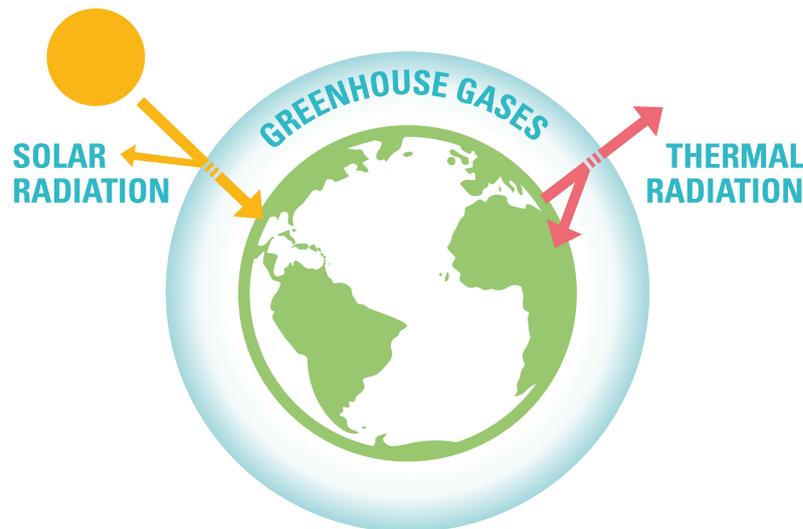


Figura 4: O efeito estufa

Os gases de efeito estufa na atmosfera da Terra incluem, por exemplo, vapor de água, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Suas concentrações, especialmente a de dióxido de carbono, aumentaram na atmosfera devido à atividade humana. Portanto, a manta fornecida pela atmosfera é mais espessa do que se tivesse sido criada apenas pelos efeitos da radiação. Hoje a temperatura da superfície da Terra é cerca de 1°C mais alta desde a revolução industrial devido aos efeitos antrópicos.

O efeito estufa significa que menos radiação escapa para o espaço do que a superfície da Terra emite. Esse fenômeno mantém a superfície da terra mais quente do que a quantidade de radiação solar absorvida permitiria.

Agora, vamos examinar o efeito estufa em termos um pouco mais quantitativos, observe a Figura 5. Considere que o fluxo de radiação térmica emitido pela superfície da Terra representa 100% (1). Apenas 10% dessa radiação térmica escapa diretamente para o espaço (2). O restante, 90%, é absorvido pela atmosfera (3). Por outro lado, a própria atmosfera também emite radiação térmica tanto na direção da superfície terrestre quanto para o espaço. Entretanto, como as temperaturas na atmosfera são tipicamente menores do que da superfície terrestre, o fluxo de radiação térmica emitido pela atmosfera para cima é relativamente pequeno e é aproximadamente metade da radiação que deixa a superfície (4). Conseqüentemente, o fluxo total de radiação térmica escapando para o espaço corresponde a apenas 60% da radiação térmica emitida pela superfície da Terra (2+4).

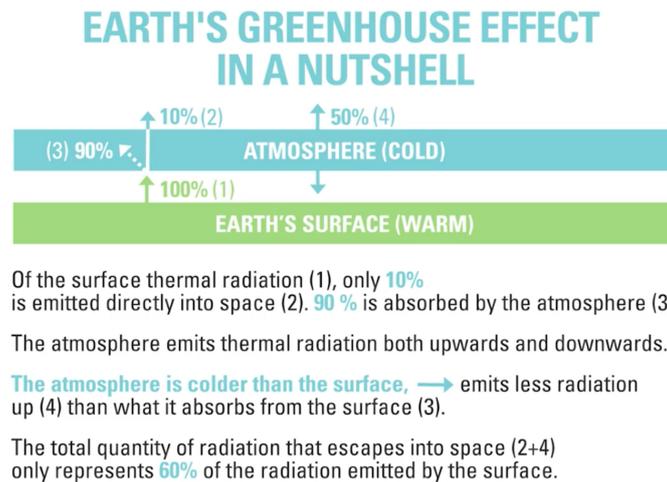


Figura 5: Porcentagens de radiação emitida pela superfície

O modelo cinza da atmosfera é um modelo matemático simples que pode ser usado para descrever o efeito estufa. Nesse modelo, a superfície do planeta é tratada como um corpo negro, cuja temperatura é T_s . A atmosfera, por outro lado, é chamada de “corpo cinza”, com temperatura T_a .

Como um corpo negro, a superfície da terra emite radiação térmica para cima em um fluxo de $F = \sigma T_s^4$. A atmosfera emite um fluxo radiação térmica de $F_a = \varepsilon \sigma T_a^4$ (1). Sendo que ε é o coeficiente de emissividade ($0 < \varepsilon < 1$). Além disso, de acordo com a lei de Kirchoff a emissividade e a absorvidade de um corpo cinza devem ser iguais. Portanto, a atmosfera absorve uma parcela de radiação térmica emitida pela superfície $\varepsilon F = \varepsilon \sigma T_s^4$ (2). O que não é absorvido pela atmosfera é emitido novamente para o espaço $F_s = (1 - \varepsilon) \sigma T_s^4$ (3). Dessa forma é possível quantificar a radiação térmica que está escapando para o espaço.

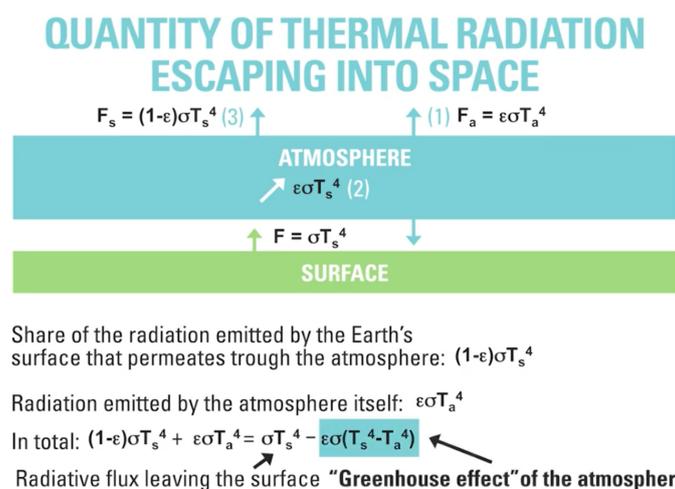


Figura 6: Fluxos de radiação emitidos pela superfície e pela atmosfera



O fluxo radioativo total que está saindo da Terra é:

$$(1 - \varepsilon)\sigma T_s^4 + \varepsilon\sigma T_a^4 = \sigma T_s^4 - \varepsilon\sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (14)$$

Portanto, pode-se dizer que a atmosfera reduz o fluxo da superfície, σT_s^4 , no valor de $\varepsilon\sigma (T_s^4 - T_a^4)$.

$$\text{Efeito estufa depende de } \rightarrow \varepsilon\sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (15)$$

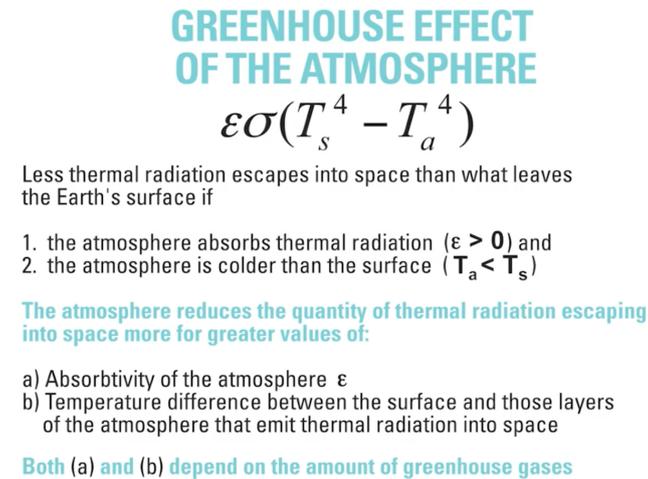


Figura 7: Quantificação do efeito estufa

Portanto, o efeito estufa aumenta se:

1. A absorvidade da atmosfera ε aumentar
2. A diferença de temperatura entre a superfície terrestre e a atmosfera for maior.

Os dois casos acima dependem da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

A tabela a seguir ilustra as porcentagens em volume de alguns gases na atmosfera e impactos de cada um no efeito estufa. Veja que 99% dos gases na atmosfera (N_2 e O_2) não causam nenhum efeito deletério de aquecimento, pois nenhum desses gases é capaz de absorver energia nos comprimentos de onda da radiação térmica. O principal gás de efeito estufa na atmosfera é o vapor d'água, entretanto a quantidade desse gás na atmosfera é muito variável e na média tem uma porcentagem pequena de composição por volume. O segundo gás de efeito estufa mais importante é o CO_2 , ele tem uma porcentagem por volume uma ordem de grandeza menor do que o $H_2O_{(vapor)}$, entretanto é responsável por um quarto do efeito estufa. Metano, óxido nitroso e ozônio também são importantes causadores do efeito estufa natural, apesar de suas concentrações serem ínfimas em comparação aos outros.

THE PERCENTAGES BY VOLUME OF DIFFERENT GASES IN THE ATMOSPHERE AND THEIR ROLES IN THE NATURAL GREENHOUSE EFFECT

	VOLUME	GREENHOUSE EFFECT*
Nitrogen (N_2)	78%	0%
Oxygen (O_2)	21%	0%
Water vapour (H_2O)	0.4%	60%
Carbon dioxide (CO_2)	0.04%	26%
Methane (CH_4)	0.0002%	} total 6%
Nitrous oxide (N_2O)	0.00003%	
Ozone (O_3)	0.00004%	8%

While clouds absorb thermal radiation, they also reflect solar radiation.

The net effect on the Earth's climate is cooling.

* Kiehl ja Trenberth (1997, Bull. Am. Meteor. Soc.)

Figura 8: Concentrações de gases na atmosfera e seus impactos no efeito estufa

Gotículas de água e cristais de gelo nas nuvens também absorvem radiação térmica contribuem para o efeito estufa. Entretanto, as nuvens tem uma alta capacidade de refletir radiação solar para o espaço. Se contabilizarmos os dois efeitos (absorção e reflexão) o efeito de reflexão é mais forte quando temos a presença de nuvens na atmosfera e o efeito das nuvens é de esfriar o clima terrestre.

Analisando a Equação 15, porque a temperatura da atmosfera é mais baixa do que a temperatura da superfície?

Existem 3 fatores que ajudam a responder isso:

1. A radiação solar aquece mais a superfície do planeta do que a atmosfera. Essa radiação consegue atravessar facilmente a atmosfera, mas não a superfície.
2. A radiação térmica esfria a atmosfera mais do que a superfície. Se observarmos o efeito total da radiação térmica absorvida e emitida pela atmosfera, observa-se que o balanço dessa radiação esfria mais a atmosfera do que a superfície da Terra. Lembre-se que a atmosfera perde muito calor para o espaço.
3. O ar aquecido próximo da superfície tende a expandir e subir para camadas mais altas da atmosfera. nesse processo ele se resfria.

O modelo cinza para a atmosfera é uma simplificação do efeito estufa na atmosfera real pois:

- Tanto na superfície quanto na atmosfera a temperatura não é homogênea.
- Diferentes comprimentos de onda da radiação térmica atravessam a atmosfera de formas diferentes.
- A superfície do planeta não é um corpo negro (é uma aproximação).

Apesar dessas simplificações o modelo cinza da atmosfera é uma boa aproximação para entendermos a essência do efeito estufa.



Resumo:

- Por causa do efeito estufa, menos radiação térmica escapa para o espaço do que a superfície da Terra emite.
- Os gases de efeito estufa mais importantes são vapor d'água e dióxido de carbono.
- Atualmente, o efeito estufa mantém a superfície da Terra $\approx 30^{\circ}\text{C}$ mais quente do que se não existisse a atmosfera.
- Quando as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera aumentam, o efeito estufa se torna mais intenso e o clima do planeta começa a esquentar.



Referências bibliográficas

- Climate.Now [MOOC]. University of Helsinki.
<https://mooc.helsinki.fi/course/index.php?categoryid=2>
- Greenhouse Effect, Habitability. Open Yale Courses.
<https://www.youtube.com/watch?v=hJjyCzXUGCQ>