

O EFEITO ESTUFA E AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Maria Emília Rehder Xavier

Licenciada em Física pelo Instituto de Física da USP de São Paulo

Américo A. F. Sansigolo Kerr

Docente do Instituto de Física da USP

Doutor em Ciências pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP

Pós-doutorado no Instituto di Cosmo-geofisica/CNR, Turim, Itália

Instituto de Física da Universidade de São Paulo – IFUSP; Rua do Matão, Travessa R, 187
CEP:05508-900; Cidade Universitária, São Paulo

Agradecimento: agradecemos ao Marcos Gatti, Mestre em psicologia e Graduando em física, por suas sugestões de revisão do texto.

O objetivo deste material é promover a aproximação do conteúdo de Física no Ensino Médio com situações cotidianas relacionadas à Educação Ambiental. Entre os vários temas possíveis o Efeito Estufa foi escolhido por se tratar de um assunto amplamente discutido e divulgado pela mídia. O desenvolvimento desta apostila fez parte de um projeto de ensino e foi analisado no trabalho de Mestrado da aluna Maria Emília Rehder Xavier. Inicialmente, o material foi aplicado nas 1^a. ou 2^a. séries do Ensino Médio de seis escolas públicas (cinco estaduais e uma municipal) que aceitaram fazer parte deste trabalho, passando por uma nova revisão a fim de ser utilizado neste curso.

Introdução

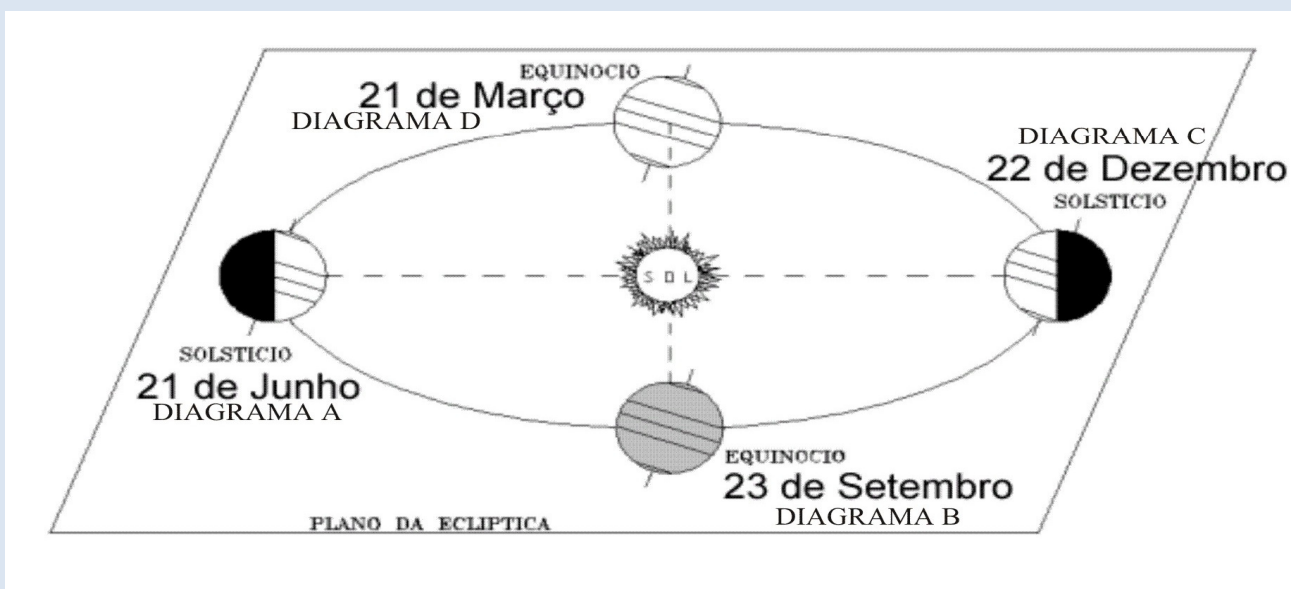
A atmosfera da Terra é constituída de gases que são bastante transparentes à passagem da radiação solar, enquanto absorvem grande parte da radiação emitida pela sua superfície aquecida. Isso faz com que a superfície terrestre tenha uma temperatura maior do que poderia ocorrer caso não existisse a atmosfera. Tal fenômeno é conhecido como Efeito Estufa.

ESTAÇÕES DO ANO: INVERNO E VERÃO

A Terra gira ao redor do Sol em uma órbita elíptica com período de aproximadamente um ano. O plano que contém esta órbita é chamado de eclíptica. A Terra também realiza um movimento de rotação em torno de seu próprio eixo que tem a duração de um dia. Esse eixo faz com o plano da eclíptica um ângulo de aproximadamente 66° (inclinação da Terra de aproximadamente 23° em relação à vertical à eclíptica). É por conta dessa inclinação que temos as estações do ano.

Isso ocorre porque as regiões da superfície terrestre que estão inclinadas em relação aos raios solares recebem do sol uma menor quantidade de energia e ficam mais frias. A figura abaixo ilustra como isso ocorre. Ela mostra a posição da Terra em relação ao Sol durante o ano. Pode-se perceber que a incidência de raios solares no primeiro diagrama (A) é maior no hemisfério norte, ficando o hemisfério sul mais escondido e sem iluminação. Nesta circunstância, no hemisfério sul se inicia o inverno, dias com menor duração e noites mais compridas, e no hemisfério norte o verão, dias mais longos e noites mais curtas. No terceiro diagrama (C) ocorre o contrário e tem-se verão no hemisfério sul e inverno no hemisfério norte. Nos segundo e quarto diagramas (B e D) têm-se as estações intermediárias, respectivamente, primavera e outono (hemisfério sul, ou o inverso no hemisfério norte). Neste caso os raios solares sobre a superfície da Terra são igualmente distribuídos entre os dois hemisférios e a duração do dia é praticamente igual a da noite.

Observação: o sol é muito maior do que a terra. Neste esquema eles estão totalmente fora de proporção, apenas para facilitar a explicação sobre as estações do ano



Há uma grande preocupação quanto aos riscos de sua intensificação e quanto aos seus reflexos sobre o clima do planeta. Avalia-se que alterações no Efeito Estufa estejam causando uma Mudança Climática Global, o que dá uma idéia da dificuldade em desenvolver estudos que prevejam suas conseqüências, dadas as dimensões e a complexidade deste problema. Neste texto vamos procurar explicar este efeito cientificamente, bem como propor experiências simples que ajudem a compreender alguns dos fenômenos físicos envolvidos com este problema. Também discutiremos brevemente algumas implicações e respostas sociais importantes para reduzirmos impactos ambientais antropogênicos que podem estar contribuindo para as Mudanças Climáticas, ao mesmo tempo em que também comprometem a sustentabilidade e a qualidade da vida em nosso planeta.

ENERGIA TÉRMICA E SEUS PROCESSOS DE TRANSMISSÃO

Calor é a energia térmica transferida de um corpo para outro por conta da diferença de temperatura entre eles, ou seja, é a energia térmica em movimento.

Quando um corpo recebe ou cede uma certa quantidade de energia térmica, pode-se observar como conseqüência, uma variação de sua temperatura ou uma mudança de estado.

A variação de temperatura corresponde a uma variação no nível de agitação das moléculas do corpo. Nesse caso, a energia térmica transferida é denominada calor sensível.

A mudança de estado corresponde a uma mudança na forma de agregação de suas partículas, passando de um estado para outro. Os estados mais conhecidos são sólido, líquido e gasoso. Nesse caso, a energia térmica transferida é denominada calor latente e corresponde à quantidade de calor necessária para ocasionar a mudança de estado.

O calor pode ser transmitido através de três processos: a condução, a convecção e a irradiação.

Na condução a transmissão ocorre através das moléculas que compõem o material que vão transferindo umas para as outras a energia térmica, mas mantendo a posição que ocupam no material.

Se você fez as experiências sobre condução de energia térmica, deve lembrar-se do que aconteceu com a colher de metal que você aqueceu. Apesar de apenas um lado da colher ter sido aquecido, as duas extremidades ficaram quentes. As partículas que constituem a colher foram passando o calor recebido.

Na convecção a transmissão de calor acontece pelo deslocamento de um fluido. Porções do fluido à diferentes temperaturas têm diferentes densidades e isto causa o movimento das porções. A convecção só pode ocorrer em líquidos e gases. Um exemplo de convecção é o que acontece com a fumaça. O ar é aquecido e fica menos denso, então ele tende a subir para lugares mais altos. Enquanto ele sobe vai se resfriando e, ao mesmo tempo, provocando a descida de ar frio, mais denso, que está lá em cima. Isto acaba gerando um fluxo de ar, chamado corrente de convecção.

O último processo de transmissão de energia térmica é a irradiação. Neste caso o calor é transmitido através de ondas eletromagnéticas. A luz, por exemplo, é uma onda eletromagnética. Esta propagação não precisa de um meio para acontecer, ela pode ocorrer no vácuo. É este processo que faz com que a energia solar chegue aqui na Terra.

O Clima

O clima é um conceito abstrato e complexo que envolve dados de temperatura, umidade, tipos e quantidade de precipitação, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar, tipo de nuvens e a área que cobrem, bem como outros fenômenos do tempo como nevoeiro, tempestades, geadas e as relações entre eles (Britannica, 2001).

É possível perceber mudanças significativas nos valores das variáveis que caracterizam o clima (temperatura, umidade etc) em diferentes locais ou ao longo de um período de tempo. Por exemplo, em um mesmo dia pode-se ter temperaturas altas e baixas, chuva ou sol, além de mudanças em outras

características. Temos as estações do ano, marcadas por dias tipicamente mais frios e secos durante o inverno e mais quente e úmidos no verão (veja a o quadro sobre estações do ano). Estas características também mudam bastante conforme a região da terra. Próximo à linha do equador, por exemplo, há maior insolação, o que gera temperaturas e níveis de umidade mais elevados. Na medida que nos dirigimos aos pólos o clima torna-se mais frio e seco. A flora e fauna tendem a ter características ajustadas ao tipo de clima em que se encontram.

Portanto, analisar se o clima global está mudando significa observar qual a tendência de uma média sobre toda a superfície terrestre destas variáveis que medem o clima (temperatura, umidade, precipitação etc) em um período suficientemente longo para verificar se as oscilações medidas não são perfeitamente normais para a natureza.

Isso significa observar estas variáveis por um período da ordem de 30 anos.

A partir daí, fica no ar a pergunta: o clima da terra está mudando?

Os dados têm mostrado pequenas variações climáticas. Assim, ainda é

difícil precisar com segurança se elas serão persistentes e por que isto está acontecendo. A partir de sua experiência, você acredita que estas mudanças estejam

Experimento 1: Sentindo o Clima

Passeie pelos arredores de sua casa ou escola e tente sentir as diferentes características climáticas que podem ocorrer mesmo quando comparamos lugares muito próximos (o que é tratado como micro-clima). Pense em relação à sua percepção de clima: se está quente ou frio, abafado ou fresco, com vento ou sem vento etc., e responda às perguntas seguintes.

Como você se sente em um dia ensolarado de verão? E em um dia de inverno? O que acontece se você estiver embaixo de uma árvore? Quando chove qual a sensação que você tem?

Experimento 2: Diferentes Percepções de Temperatura

Em seu caminho para casa ou para escola, coloque a mão em diferentes materiais e tente perceber quais estão mais frios ou quentes. Uma sugestão seria fazer o teste em pisos de asfalto e cimento, em uma parede de tijolos e um gramado. O que você percebeu? Quais são mais quentes? Por que você acha que isto acontece?

ocorrendo? Você acha que o verão está mais quente, ou seja, tem atingido temperaturas mais altas? E o inverno?

Balanco radiativo Terra-Sol

Toda a energia disponível na Terra, basicamente, vem do Sol. Desse modo, o Sol funciona como motor do sistema climático de nosso planeta.

Considerando-se o sistema formado unicamente pela Terra e o Sol, pode-se obter um **modelo para estimar a temperatura média da superfície terrestre**, usando a teoria de emissão e absorção de radiação por corpo negro.

O espectro do Sol é parecido com o espectro de um corpo negro a uma temperatura de 6000K, que emite radiação com pico na região da luz visível (ondas curtas). Já a Terra tem um espectro parecido com o de um corpo negro a uma temperatura de 300K, emitindo radiação com pico na faixa do infravermelho (ondas longas).

O que são Modelos Científicos?

Na área científica um modelo representa um conjunto de hipóteses, teorias, funções matemáticas que explicam como funciona um determinado fenômeno. Eles permitem que sejam feitas previsões teóricas sobre que tendência ou resposta deve-se esperar para um dado fenômeno em estudo. Vocês por exemplo já conhecem um modelo sobre a constituição da matéria, segundo o qual ela é composta por moléculas, que por sua vez são combinações de átomos que distinguem diferentes elementos químicos. Estes modelos vêm adquirindo complexidade cada vez maior, e têm permitido, por exemplo, uma grande evolução no conhecimento e desenvolvimento de materiais.

Teoria de emissão e absorção de radiação de corpo negro

O que é um corpo negro?

Para a Física um corpo negro ideal é um sistema que absorve toda a radiação eletromagnética que recebe. Lembra da experiência onde você deveria observar quais corpos eram mais quentes e frios. Qual deles era o mais quente?

O mais quente era o piso de asfalto e isto se deve a característica de um corpo negro. O asfalto absorve praticamente toda a radiação que o atinge, ocorrendo um aumento de sua temperatura.

Mas o corpo negro também é aquele que melhor irradia a energia que tem armazenada em si. A teoria de emissão e absorção de radiação de corpo negro diz que quanto maior a temperatura de um corpo negro, maior a potência de emissão de radiação e menor o comprimento de onda onde ocorre o valor máximo desta potência.

A potência de emissão de energia por um corpo negro é dada pela seguinte relação:

$$E_B = \sigma T^4 \quad (1)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann (vale $5,6703 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) e T a temperatura absoluta do corpo (em Kelvins).

A Terra absorve a radiação solar a uma taxa de:

Como os objetos esquentam?

Condução: aqueça a ponta de uma colher de metal e observe o que acontece com a outra extremidade da colher.

Convecção: Observe o que acontece com a fumaça que sai dos carros ou das chaminés de indústrias e restaurantes. Você pode observar esse mesmo processo em um sistema fechado. Pegue uma vasilha de vidro que possa ser levada ao fogo, encha com água e “confetes” feitos de papel alumínio e depois esquite-a até a fervura. O que acontece com os pedacinhos de papel alumínio?

Radiação: perceba a sensação de calor que você sente na sua pele banhada diretamente pelo sol, pelas brasas de uma fogueira, o calor que chega à sua mão quando a aproxima de um ferro de passar roupa aquecido.

$$E_A = \frac{S}{4}(1 - \alpha) \quad (2)$$

onde

S é a taxa de radiação solar que chega ao topo da atmosfera terrestre, chamada de constante solar. Sua medida por satélites varia entre 1365 a 1372 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (Ramanathan et al., 1989);

α é a fração de radiação refletida pela superfície e atmosfera terrestres (albedo), que vale aproximadamente 0,30;

o fator 1/4 deve-se à distribuição desta energia sobre a superfície terrestre. Veja que o disco da Terra que intercepta a radiação solar tem área πR^2 . Mas a energia distribui-se pela superfície esférica da terra ($4\pi R^2$). Portanto, $\pi R^2/4\pi R^2 = 1/4$.

Considerando-se que em um ciclo anual a temperatura média da Terra é aproximadamente constante, há um equilíbrio dinâmico entre a energia que ela ganha do sol e perde para o espaço. Assim, é possível igualar a eq. 2 com a eq. 1, ou seja,

$$\frac{S}{4}(1 - \alpha) = \sigma T^4 \quad (3)$$

Substituindo os respectivos valores numéricos na equação (3), tem-se:

$$\begin{aligned} 1368,5 (1 - 0,30)/4 &= \sigma T^4 \\ 239,5 &= 5,6703 \times 10^{-8} T^4 \\ 239,5 / (5,6703 \times 10^{-8}) &= T^4 \\ 4.223.985.891 &= T^4 \\ T &= 255 \text{ K, ou seja, } T = -18^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Isso significa que a temperatura calculada para a superfície terrestre, considerando apenas o sistema terra-sol deveria ser de 255K, ou seja, -18°C . Este valor é cerca de 33°C menor que o observado ($\sim 14,5^\circ\text{C}$), mostrando que apenas o equilíbrio radiativo Terra-Sol não basta para explicar a temperatura média da superfície terrestre.

A Atmosfera e o Efeito Estufa

O principal fator que possibilita à temperatura média da superfície terrestre sair de um valor estimado em -18°C para os $14,5^{\circ}\text{C}$ que ocorrem na prática, é a presença da atmosfera entre a superfície da terra e o sol.

Na atmosfera acontecem processos de troca de energia térmica que influenciam muito o clima terrestre. Existe a condução de calor, a convecção e por último a interação da radiação eletromagnética com os gases e partículas que compõem a atmosfera. No quadro “Energia térmica e seus processos de transmissão” há explicações para compreendê-los melhor. Mas a parcela mais relevante nesta troca de energia relaciona-se com a interação da radiação eletromagnética e a atmosfera. Para um determinado arranjo entre comprimento de onda e composição química dos componentes envolvidos a radiação pode ser espalhada por partículas, dependendo do tamanho dessas partículas. Já a absorção da radiação relaciona-se aos processos quânticos de transição de estados energéticos das

Experimento 3: Diferentes substâncias, diferentes colorações

Observe a cor da chama de seu fogão. Por que você acha que ela tem esta coloração?

Pegue uma colher de metal e esfregue-a no sal de cozinha para que uma camada de grãos de sal fique presa à colher. Em seguida, coloque-a na chama do fogão. O que acontece com a cor da chama?

Por último, aqueça um pedaço de fio fino de cobre e observe a cor da chama.

ATENÇÃO: Tenha cuidado ao fazer esta experiência pra não se queimar ou provocar um incêndio. Use uma luva protetora ou pinça quando for aquecer os objetos e não se esqueça de apagar a chama quando terminar o exercício.

Espectros de radiação de elementos e compostos químicos

Átomos e compostos químicos absorvem e emitem luz, e fazem isto com cores que são características deles. O conjunto de cores emitidas ou absorvidas podem ser decompostas em linhas que compõem o que chamamos de espectro característico do elemento ou composto. Cada elemento ou composto químico pode ser identificado por esse seu espectro.

No experimento que foi feito anteriormente pode-se notar que para cada situação a cor da luz emitida era diferente. O gás do fogão emite luz azul, o sal de cozinha amarela e o cobre verde. Considerando-se a luz como uma onda eletromagnética, a cada cor emitida ou absorvida há um comprimento de onda correspondente. A radiação eletromagnética emitida ou absorvida não é constituída apenas por luz visível, mas pode ser constituída por radiações que nossos olhos não vêem como ultravioleta ou infravermelho. Normalmente os espectros são representados pelos respectivos comprimentos de onda.

Este tipo de processo acontece com os elementos ou compostos químicos que constituem nossa atmosfera. Eles absorvem e emitem radiação apenas em alguns comprimentos de onda característicos deles.

Esta propriedade também é muito utilizada na pesquisa e identificação de elementos e compostos químicos que constituem as estrelas ou nuvens. por exemplo.

moléculas de gases atmosféricos. Eles absorvem ou emitem radiação em comprimentos de ondas que representam propriedades características de cada um deles, como exemplifica o quadro “Espectros de radiação de elementos e compostos químicos”.

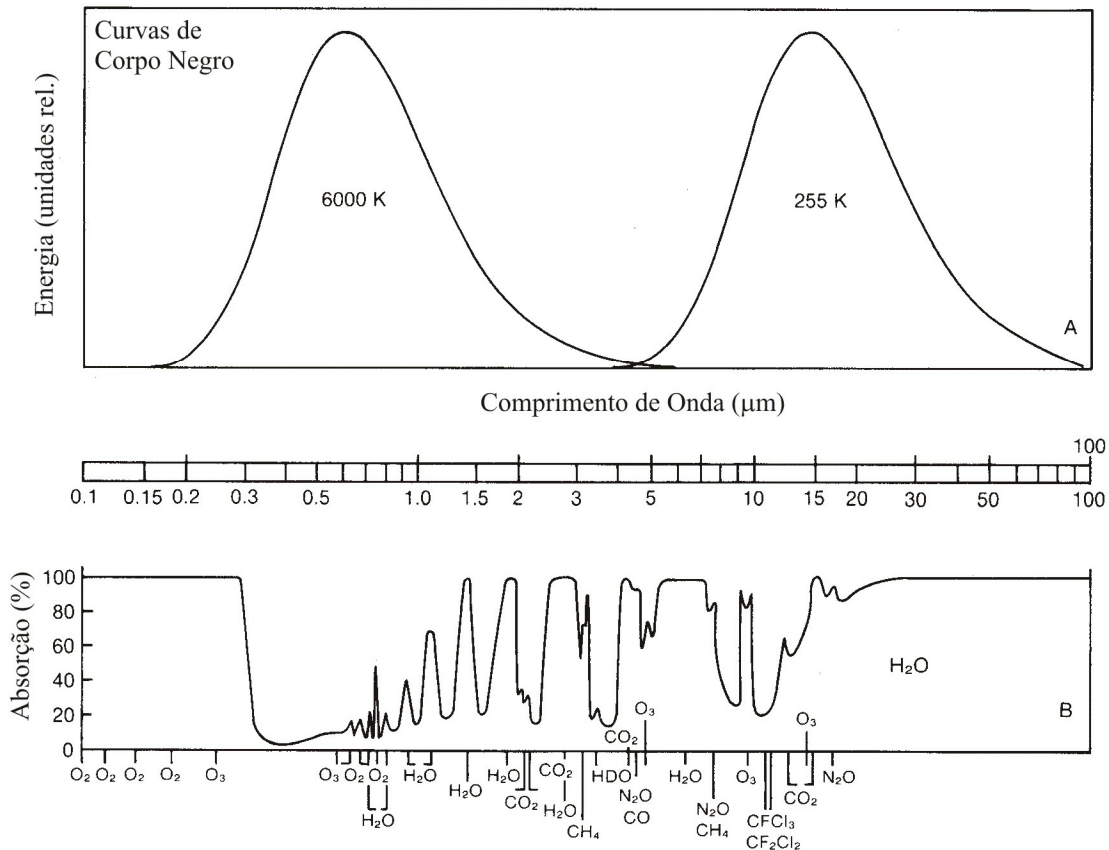


Figura 1: (a) Distribuição espectral de corpos negros a 6000K e 255K, correspondentes às temperaturas de emissão do Sol e da Terra. (b) Porcentagem de absorção atmosférica para radiação passando do topo da atmosfera para a superfície.

FONTE: MITCHELL, John. The greenhouse effect and climate change. Reviews of Geophysics, p. 117, fev.1989

A figura 1 mostra os espectros de radiação emitidos pelo sol e pela terra, bem como os espectros característicos de absorção de radiação pelos componentes da atmosfera terrestre. Você pode observar que as moléculas de vapor de água, dióxido de carbono e alguns outros gases praticamente não absorvem a radiação solar (ondas curtas), mas absorvem a radiação emitida pela superfície da Terra (ondas longas). Estes gases atmosféricos aquecidos também emitem radiação, da qual uma parte dirige-se para a terra e outra parte para o espaço. O aquecimento adicional da superfície terrestre por esse processo é chamado de Efeito Estufa. Como pode-se perceber, ele contribui para uma condição climática bastante favorável ao desenvolvimento da biosfera terrestre.

Gases atmosféricos que são relativamente transparentes para a radiação solar, mas absorvem a radiação emitida pela superfície da Terra, são chamados de gases estufa. Os mais importantes têm ocorrência natural e são o vapor de água, dióxido de carbono, ozônio, metano e óxido nitroso.

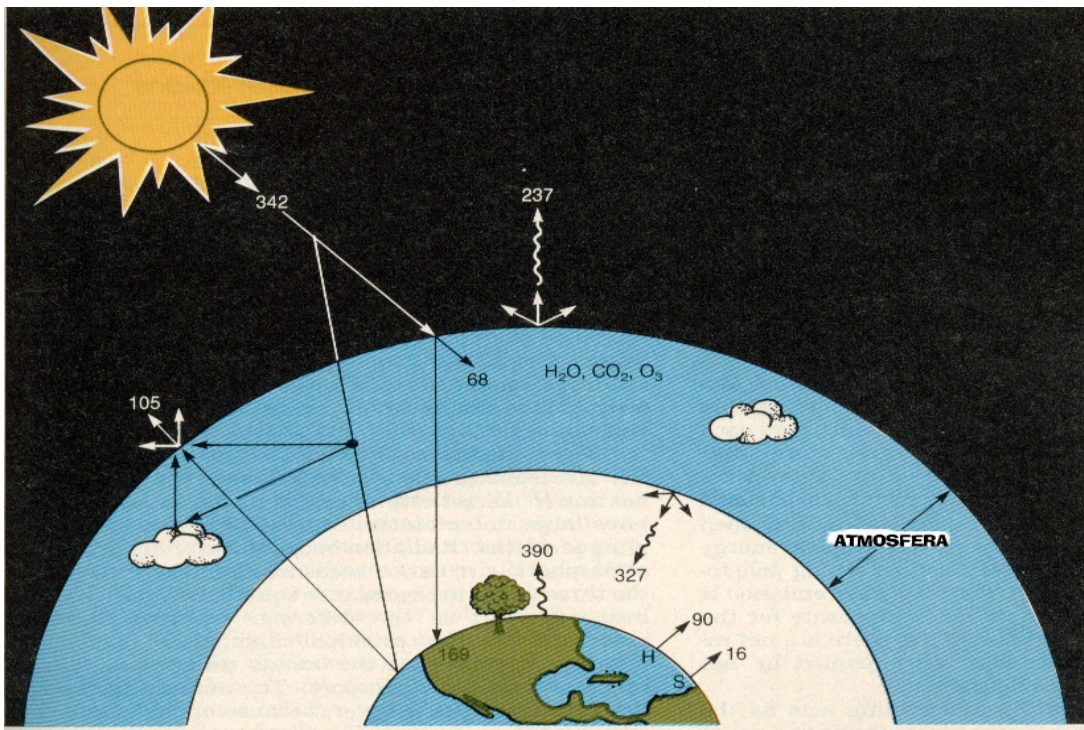


Figura-2 – Esquema ilustrativo do equilíbrio energético Sol – Terra e Atmosfera.

Fonte: Ramanathan, V.; Barkstrom B. R.; Harrison, E. F.; Climate and Earth's Radiation Budget, Physics Today, May 1989).

Observando-se a figura 1 percebe-se que sob a curva de emissão de corpo negro a 6000K, aproximadamente o espectro do Sol, a maior parte da radiação emitida se encontra em comprimento de onda de luz visível e uma parte bem menor em comprimento de onda de ultravioleta. Comparando-se as duas partes da figura, nota-se que nestes comprimentos de onda, ocorre uma grande absorção da luz ultravioleta pelo O_3 e O_2 (na camada de ozônio) e a luz visível atravessa uma atmosfera quase transparente, atingindo a superfície terrestre.

Analisando-se da mesma forma, a parte referente ao espectro de corpo negro a 255K, aproximadamente o espectro de emissão da Terra, nota-se que grande parte da radiação é em comprimento de ondas curtas (infravermelho) e nesta faixa a absorção por gases como vapor de água e dióxido de carbono é grande. Nesta região também estão indicadas linhas de absorção de outros gases estufa.

Equilíbrio Energético Sol – Terra e Atmosfera Terrestre

A figura 2 sintetiza os principais processos de troca de energia térmica entre o sol, a superfície terrestre e a atmosfera. Os números na figura estão em W/m^2 (ou seja, energia distribuída por segundo e por m^2). A potência por metro quadrado que o sol distribui sobre a terra e a atmosfera é 342 ($S/4$ na equação (2) e nas contas após equação (3)). O que Terra e atmosfera juntas refletem vale 105 (é o albedo, obtido utilizando-se $\alpha=0,30$ vezes $S/4$, na equação (2)). A terra absorve 169 e emite 390 como infravermelho (ondas longas) que é absorvido pelos gases estufa na atmosfera. A atmosfera por sua vez devolve 327 para a terra. A terra mais atmosfera perdem 237

para o espaço (também em infravermelho). Pode-se separar o que é refletido (105) do que é emitido pela terra e atmosfera (237) porque o refletido é composto por raios solares (ondas curtas - especialmente luz visível), enquanto o emitido é composto por ondas longas (infravermelho). No ponto em que $H=90$, temos representada a energia térmica que o vapor de água libera na atmosfera quando se condensa para formar as nuvens, enquanto que no ponto $S=16$ temos a representação da transmissão de calor da superfície terrestre para o ar através da condução e da convecção.

Perturbações no Efeito Estufa e Mudanças Climáticas Globais

A tabela 2 mostra a concentração atual dos gases estufa na atmosfera e a parcela de retenção de energia de cada um deles para o Efeito Estufa (cujo total é de cerca de 155W.m^{-2}). Percebe-se que o vapor de água participa com 65% do efeito, o CO_2 com 32% e os demais gases com apenas 3%. Claro, portanto, que o vapor de água é o principal gás estufa e que o CO_2 é o segundo em importância, com uma contribuição que é a metade do primeiro.

1	2	3	4
Gás	Concentração (ppm)	Aquecimento Estufa (W.m^{-2})	Varição desde o ano 1750 até ~2005 (W.m^{-2})
vapor de água (H_2O)	~3000	~100	
dióxido de Carbono (CO_2)	345	~50	1.66
metano (CH_4)	1.7	1.7	0.48
óxido nitroso (N_2O)	0.30	1.3	0.16
ozônio (O_3) na Troposfera	$10\text{-}100 \times 10^{-3}$	1.3	0.35
CFC 11	0.22×10^{-3}	0.06	0.06
CFC 12	0.38×10^{-3}	0.12	0.12
Todos os halocarbonos	0.22×10^{-3}	0.34	0.34
Total		154.82	2.99

Tabela 2: Concentrações atuais e aquecimento estufa devido a gases traço

FONTE: MITCHELL, 1989 e IPCC, 2007.

Na verdade, a maior preocupação tem sido com mudanças relativamente recentes e ponderáveis nas concentrações de gases devido a atividades antropogênicas. Isso foi observado mais intensamente a partir de 1750, com o advento da primeira Revolução Industrial. A geração de energia elétrica, o aperfeiçoamento e expansão do sistema de transporte, o aquecimento de ambientes internos, etc., basearam-se essencialmente no consumo de energia obtida pela queima de combustíveis fósseis, principal recurso energético empregado até hoje. Esta é a maior fonte antropogênica de gases estufa, como o dióxido de carbono. Além disso, o uso de combustíveis fósseis é responsável pela emissão de metano e outros compostos orgânicos (a atividade entérica é outra fonte grande de metano). O aumento das

concentrações de O_3 na troposfera, também deve-se particularmente às reações fotoquímicas que se processam com produtos e resíduos do uso de combustíveis fósseis.

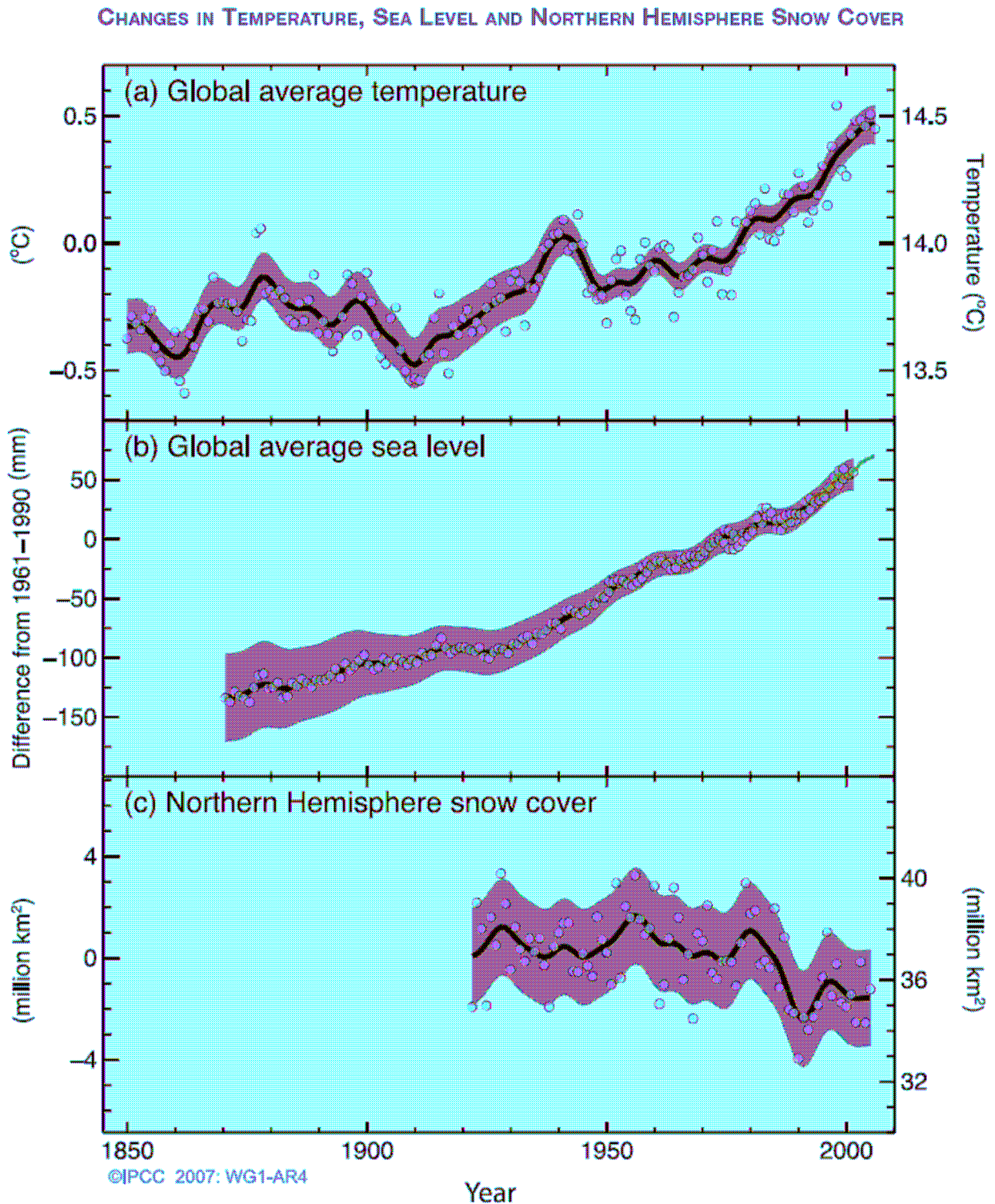


Figura-3: Variação da temperatura média da superfície da Terra, do nível dos oceanos e da cobertura por neve desde o ano de 1861 até o ano 2005 (IPCC, 2007).

Avalia-se que a temperatura média da terra esteja subindo e os modelos climáticos atuais têm relacionado isto ao aumento da concentração dos gases estufa.

A última coluna da tabela 2 mostra a variação na retenção de energia devido ao incremento observado na concentração de gases estufa desde o ano de 1750. Percebe-se, por exemplo, que enquanto a contribuição do CO₂ no efeito total (coluna-3) é ~30 vezes maior que a do metano, sua parcela no incremento observado (coluna 4) é apenas 3 vezes maior que a do metano. Portanto, para fins de análise dos deslocamentos de tendências climáticas, pode-se apontar como fator de maior peso os correspondentes deslocamentos nas concentrações e nos diferentes fatores climáticos por conta de fontes antropogênicas.

O balanço energético global do planeta é complexo e a concentração dos gases é apenas um dos componentes que o influenciam. Vejamos alguns outros aspectos.

Contexto geral dos fatores que regem o clima e suas mudanças

Os Modelos Climáticos Globais têm estimado que as emissões antropogênicas estão causando uma intensificação do Efeito Estufa. Avalia-se como consequência que desde 1861 a temperatura média da terra subiu 0,76°C, como pode ser observado na figura 3. Mesmo se as concentrações dos gases estufa parassem de aumentar, eles continuariam contribuindo para uma tendência de aquecimento do planeta. Isso porque alguns gases permanecem atuando na atmosfera por um longo tempo após sua emissão.

As possíveis consequências deste aquecimento seriam:

- derretimento da água congelada na cobertura de montanhas e em geleiras;
- a elevação dos oceanos devido à expansão térmica de suas águas e ao degelo;
- aumento da quantidade de nuvens, vapor de água e, conseqüentemente, da quantidade de chuvas;
- alteração das características do ambiente em diferentes regiões, etc.

Mas estas são as tendências avaliadas como mais prováveis e não certas absolutas. Da mesma forma, mesmo que seja muito provável, não é absolutamente certo que as mudanças climáticas sejam de origem antropogênica. Podem ser oscilações naturais do clima, ainda não determinadas adequadamente. Note-se ainda que, o próprio valor para a variação detectada na temperatura média da superfície terrestre (0,76°C) é um valor muito próximo das incertezas associadas à sua medida. Apenas recentemente a comunidade científica passou a considerar que este é um sinal que se diferencia das incertezas de medida.

Vejamos um pouco melhor a complexidade deste problema.

Como vimos no item “Balanço radiativo Terra-Sol”, a energia ou radiação solar que chega ao planeta é balanceada pela radiação terrestre que sai, considerando-se um ciclo global médio. Mas a maior incidência de radiação na faixa equatorial gera uma circulação atmosférica global entre as regiões polares e a região equatorial da terra. Juntamente com as correntes marinhas, ela transporta energia em direção aos polos. Qualquer alteração na radiação recebida do Sol ou perdida para o espaço,

ou mudanças na redistribuição dentro da atmosfera ou entre a atmosfera, terra e oceanos, pode afetar o clima.

Chama-se forçante uma mudança na energia radioativa líquida disponível no sistema Terra-atmosfera. Ela será positiva ou negativa à medida que propicie aquecimento ou resfriamento do sistema, respectivamente. Os gases estufa, portanto, têm representado uma forçante positiva.

Mas o próprio uso de combustíveis fósseis que gera gases estufa, também propicia a formação de partículas que podem espalhar a radiação solar, sendo esta uma forçante negativa. Já o negro de fumo (fuligem negra nas combustões) absorve radiação com alta eficiência, sendo uma forçante positiva. Na maioria dos casos avalia-se que os aerossóis troposféricos tendem a produzir uma forçante negativa e provocar um resfriamento.

As nuvens representam um dos principais fatores de incerteza nos modelos climáticos. Alterações nos padrões das nuvens tanto poderão produzir um efeito de aquecimento quanto resfriamento, dependendo das características que prevaleçam. Por exemplo, o albedo - reflexão da luz - é uma forçante negativa, enquanto o calor liberado na condensação do vapor de água é uma forçante positiva.

O que é realimentação?

Uma realimentação positiva ocorre quando a alteração produzida por um determinado efeito provoca um aumento continuado deste mesmo efeito. Veja um exemplo. As grandes superfícies cobertas por gelo ou neve, refletem quase toda a energia solar de volta para o espaço. Isso, portanto, tende a manter fria a superfície terrestre. Se a atmosfera terrestre se aquecesse e com isso derretesse parte destas superfícies geladas, a camada de solo passaria a receber energia solar e se aqueceria. Com isso o ar também passaria a receber mais energia térmica da terra, ficando ainda mais quente, derretendo mais gelo e neve, expondo mais solo ao sol e, assim, progressivamente a superfície terrestre ficaria cada vez mais quente. A realimentação será negativa se ocorrer o oposto. Por exemplo, o aumento da temperatura da terra poderia produzir mais nuvens, que poderiam refletir mais energia solar de volta para o espaço e com isso resfriar a terra.

As nuvens, os oceanos, as mudanças no padrão de crescimento dos vegetais etc apresentam efeitos de realimentação que representam atualmente a principal fonte de incerteza nos modelos de mudanças climáticas globais.

Erupções vulcânicas são ocasionais. A grande quantidade de partículas que lançam na atmosfera pode espalhar a radiação solar, representando forçantes negativas cujos efeitos podem persistir por alguns anos. A radiação solar recebida pela terra também sofre oscilações lentas e características. Uma delas está associada ao número de manchas solares. Há variações com períodos mais longos (19.000, 24.000, 41.000 e 100.000 anos) relacionadas a mudanças na distância terra-sol, devido às perturbações induzidas por outros planetas e pela lua. Essas mudanças têm que ser consideradas nos modelos climáticos, avaliando-se que foram importantes na definição de variações climáticas em passado mais distante.

Há, ainda, uma série de efeitos de realimentação positiva ou negativa, que podem intensificar ou atenuar mudanças de temperatura. Maiores temperaturas, por exemplo,

provocam maior taxa de vapor de água na atmosfera, o que por sua vez intensificaria o Efeito Estufa. Mas isso pode, ainda, alterar o padrão das nuvens, gerando uma realimentação negativa.

A resposta do clima às forçantes tem várias escalas de tempo. A grande capacidade térmica dos oceanos, por exemplo, determinam hoje um fator de inércia que pode chegar a milhares de anos até que se observe a resposta a forçantes (positivas ou negativas). Mas qualquer um dos fatores que interferem no balanço radiativo terrestre acaba introduzindo alterações nos padrões do clima, em escala global ou regional.

“Para distinguir mudanças climáticas antropogênicas de variações naturais, é necessário identificar o ‘sinal’ antropogênico contra o ‘ruído’ de fundo da variabilidade climática natural”. Portanto, qualquer mudança climática causada por ações antropogênicas estará embutida nas variações climáticas naturais que ocorrem em uma série de escalas de tempo e espaço. A variabilidade climática pode acontecer como um resultado de alterações naturais nas forçantes do sistema climático, por exemplo, variações na radiação solar recebida e mudanças na concentração de aerossóis provenientes de erupções vulcânicas. Variações naturais também podem ocorrer na ausência de mudanças nas forçantes externas, como resultado de interações complexas entre componentes do sistema climático, por exemplo, o acoplamento entre atmosfera e oceanos” (IPCC, 2001). Essa é uma síntese importante para esta parte da discussão, extraída dos relatórios do último encontro do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Os relatórios destes encontros são fontes de consulta fundamentais sobre esta questão. Fornecem dados atualizados do sistema climático e do trabalho desenvolvido pelos principais grupos científicos internacionais que atuam nessa área.

Os modelos científicos e as iniciativas sociais

Como apontado nesta revisão, os modelos climáticos em seu estágio atual estimam que haverá um aquecimento global a apontam como presumíveis e desastrosas consequências:

- derretimento da água congelada na cobertura de montanhas e em geleiras;
- a elevação dos oceanos devido à expansão térmica de suas águas e ao degelo;
- aumento da quantidade de nuvens, vapor de água e, conseqüentemente, da quantidade de chuvas;
- alteração das características do ambiente em diferentes regiões, etc.

Mas está claro que esta não é uma evolução inexoravelmente definida e que há incertezas apreciáveis em tais previsões.

Independentemente da racionalidade científica com que analisamos o problema a possibilidade de que venham a ocorrer catástrofes climáticas é algo muito presente no imaginário das pessoas. A maioria percebe as profundas alterações que a humanidade tem introduzido sobre a face da terra. Suas consequências localizadas são perceptíveis e determinadas (impermeabilização do solo e freqüentes inundações,

efeito ilha de calor, malefícios da poluição do ar, stress urbano etc). É intuitivo, portanto que conseqüências globais desastrosas também estejam se delineando, mesmo que possa haver ainda muitas incertezas quanto aos resultados oferecidos pelos modelos científicos.

Ocorre que, se os modelos estiverem corretos quanto à avaliação das interferências antropogênicas sobre o clima, é imprescindível uma ação rápida para controle das emissões dos gases estufa.

Essa ação envolveria uma intervenção radical na principal base energética de nossa sociedade, que fundamenta-se na queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, gasolina, diesel, querosene, etc.), principalmente na produção direta de energia e transportes. Isso afetaria os interesses imediatistas de lucro de todo sistema capitalista de produção e comércio de mercadorias. Também envolveria conflitos políticos e econômicos, como pode-se notar na manifestação do presidente americano George Bush contra a redução de emissão de CO₂ proposta pelo Protocolo de Kyoto. Esse tipo de manifestação contrária à adoção de limites de emissão de poluentes busca fundamentar suas posições nos “custos econômicos” envolvidos nos processos de prevenção de efeitos que são muito incertos, segundo seu ponto de vista.

Não há dúvidas de que as incertezas existem. Mas se tais previsões se concretizarem, os danos econômicos e sociais projetados serão muito superiores aos ganhos que poucos terão acumulado ao ignorarem o controle da parcela antropogênica do Efeito Estufa.

Independentemente das incertezas quanto às mudanças climáticas e seus efeitos, não há dúvidas quanto aos danos advindos das mesmas ações antropogênicas que geram os gases estufa. A produção de energia, os transportes e outras fontes de gases estufa, também geram outros poluentes e vários danos à saúde humana e ao meio ambiente em geral. Estima-se que cerca de 700 mil mortes prematuras no ano de 1997 foram relacionadas à poluição atmosférica, sendo a maior parte acoplada aos processos que geram gases estufa.

Está claro que se a catástrofe climática tem doses de incerteza, a catástrofe cotidiana da poluição do ar e degradação ambiental é bastante concreta e palpável. Solucioná-las significaria também prevenir os danos ainda maiores que podem advir das mudanças climáticas. São apenas os objetivos de lucro imediato e a qualquer custo que sustentam a negativa dos impérios econômicos em assumir medidas como aquelas propostas pelo Protocolo de Kyoto.

A responsabilidade do ser humano

Quando falamos em mudanças climáticas globais ou qualquer outro assunto relativo a problemas ambientais é comum a grande maioria das pessoas achar que a responsabilidade em preservar, fiscalizar e tomar medidas contra a intensificação dos problemas ambientais já existentes ou o surgimento de novos é do governo. É

importante salientar que todos nós, como seres humanos, temos nossa parcela de culpa na degradação e responsabilidade na preservação ambiental.

A consciência de que nossas ações podem fazer diferença, de que cada cidadão é responsável pelo lixo que produz, pelos gases que joga na atmosfera de várias maneiras (como ao usar meios de transportes que utilizam combustíveis fósseis), o entendimento de que educação ambiental é obrigação e responsabilidade de todos e que pequenos atos podem fazer uma grande diferença nos dá mais força para exigir dos governantes uma política ambiental mais responsável. É necessário considerar nossa qualidade de vida e a manutenção das condições de nosso planeta como mais importantes que as vantagens econômicas ou políticas voltadas para poucos.

É importante que todos tenham acesso a boas informações para que possamos efetuar ações efetivas para conscientização ambiental de todos, aumentando o entendimento da dimensão desses problemas, o porquê de sua ocorrência e o que deve ser feito para sua amenização.

Referências

1. Maria E.R. Xavier, Américo A. F. S. Kerr, *A análise do efeito estufa em textos para-didáticos e periódicos jornalísticos*, Anais do VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Águas de Lindóia, SP, Brasil, 5 a 8 de Junho de 2002
2. L. Cifuentes et al, Hidden health benefits of greenhouse gas mitigation, *Science*, 1257-1259, vol. 293, 17 August 2001
2. John Mitchell, *The greenhouse effect and climate change*. *Reviews of Geophysics*, p. 117, fev.1989
3. V. Ramathan, B. Barkstrm e E. Harrison, *Climate and earth's radiation budget*, *Physics Today*, 22-32, May1989
4. Encyclopaedia Britannica, versão CD Deluxe, 2001
5. IPCC, 2007; Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change: <http://www.ipcc.ch>.
6. www.iag.usp.br/siae98/estufa/estufa.htm
7. www.centroclima.org.br/efeito_estufa.htm

O Efeito Estufa e as



Mudanças Climáticas Globais

**Maria Emília Rehder Xavier
Américo A. F. Sansigolo Kerr**