

EFEITO ESTUFA: CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS

AUTOR: KENITIRO SUGUIO

ABSTRACT

The earth's warming, mostly due to the carbon dioxide in the atmosphere, is still longtime known as the "greenhouse effect", because it works a bit like an ordinary greenhouse used for culture of flowers and vegetables .

This paper deals with the correct definition of this phenomenon and discussions about the past changes in climate and sea-level due to natural mechanisms, followed by scenarios of probable future high sea-level produced by global temperature rise due to additional "greenhouse gases" supplied by anthropic sources .

The physical enviromental and socio-economical worldwide consequences of sea-level rise are also briefly discussed and considered the fact that, whatever might be the ultimate cause the contemporary sea-level exhibits in general upward trends, according to the tide gauge studies during the last century, some methods to prevents or, at least mitigate its impact are considered.

RESUMO

O aquecimento da Terra, principalmente devido ao dióxido de carbono atmosférico, é conhecido há muito tempo como "efeito estufa", porque ele funciona de modo semelhante às estufas comuns destinadas ao cultivo de flores e verduras.

Este artigo trata da correta definição do fenômeno e discute sobre as mudanças pretéritas de clima e nível marinho devidas a

mecanismos naturais, seguidas por cenários de futuros níveis marinhos produzidos por elevação global da temperatura devido aos "gases estufa" adicionais fornecidos por fontes antrópicas.

As conseqüências físicas, ambientais e sócio-econômicas mundiais da elevação do nível marinho são também resumidamente discutidas e, considerando o fato de que, qualquer que seja a causa derradeira, o nível marinho atual exhibe em geral uma tendência ascendente, de acordo de estudos de mareogramas do último século, alguns métodos para prevenir ou, ao menos diminuir o seu impacto são considerados.

INTRODUÇÃO

Contrariamente à conceituação mais comum entre nós, o "efeito estufa" não é um fenômeno que acontecerá no futuro, mas é uma característica natural já existente na atmosfera terrestre.

Por outro lado, não é um mecanismo exclusivo da Terra. De fato, Vênus, Terra e Marte apresentam diversidades muito grandes nas suas temperaturas superficiais, que são ocasionadas principalmente pelas diferenças nas capacidades de suas atmosferas em absorver raios infravermelhos. Sendo a atmosfera de Vênus composta de CO_2 quase puro (97%), apresenta uma capacidade de absorção de raios infravermelhos cem vezes superior à da Terra, resultando em temperatura superficial de mais ou menos 426°C . A delgada atmosfera de Marte, por outro lado, caracterizada por baixa concentração de CO_2 e H_2O , faz com que sua temperatura superficial seja muito baixa. Em situação intermediária entre Vênus e Marte, encontra-se a Terra, cuja atmosfera, apresenta CO_2 e H_2O em teores tais que mais radiação infravermelha do que Marte e menos do que Vênus. Sem o CO_2 e H_2O na atmosfera a temperatura superficial da Terra seria inóspita (cerca de menos 18°C), muito mais fria que a temperatura média atual que é de 14°C .

EFEITO ESTUFA E GASES ENVOLVIDOS

A temperatura de um planeta é determinada pela relação de intensidade de radiação solar recebida / refletida e pelo nível de retenção de calor pela sua atmosfera. No entanto, vapor d'água, CO_2 e alguns outros gases, denominados de "gases estufa" absorvem parte da energia, não deixando retornar através da atmosfera para o espaço. Como a atmosfera aprisiona o calor aquecendo a Terra de modo análogo às estufas, este fenômeno passou a ser conhecido como "efeito estufa", constituindo condição essencial para a existência da vida sobre este planeta (Fig. 1).

Os gases que causam o efeito estufa são o dióxido de carbono, metano e compostos cloro-fluor-carbonetos, lançados à atmosfera por atividades antrópicas.

Antes do ano de 1800, quase todos os trabalhos eram executados por energia fornecida pela queima de biomassa, ventos, quedas de água, animais ou músculo humano. Nenhuma dessas atividades contribuía com volume considerável de CO_2 adicional à atmosfera, no máximo reciclando parte destes gases.

Porém, o advento da revolução industrial com a invenção das máquinas a vapor e, mais tarde, dos motores a óleo diesel e gasolina levaram à queima de grandes quantidades de combustíveis fósseis.

Nas últimas décadas, a queima de petróleo e carvão, o desmatamento e a manufatura de cimento teriam liberado quantidades de CO_2 suficientes para aumentar sua concentração na atmosfera em cerca de 20% entre 1860 e 1960. Segundo a Figura 2-A (Keeling et. al., 1982), a concentração de CO_2 teria aumentado em 8% entre 1958 a 1985. Recentemente, as concentrações de óxido nitroso (Fig. 2-B), de compostos cloro-fluor-carbonetos (Fig. 2-C), de metano (Fig. 2-D) e de alguns outros gases, que também absorve radiação infravermelha, têm

aumentado (Lacis et. al., 1981). Ramanathan et. al. (1985) estimam que esses gases aqueceriam a Terra, tanto quanto o CO_2 individualmente.

PROVÁVEIS CONSEQÜÊNCIAS DIRETAS DOS "GASES ESTUFA" ADICIONAIS

No momento, o conhecimento científico sobre o assunto não é suficiente para se avaliar precisamente os impactos, mas deve se esperar por mudanças significativas, com provável aumento da temperatura média sobre a superfície terrestre.

Uma das incertezas diz respeito às previsões sobre o incremento futuro dos gases estufa, devido ao desconhecimento do futuro perfil das fontes de energia em uso, crescimento econômico dos países, permanência de CO_2 emitido na atmosfera, etc. Nordhaus & Yohe (1983) em recente relatório da Academia Nacional de Ciências dos EUA (NAS-National Academy of Science), calcularam que existe 98% de probabilidade de que em 2050 as concentrações serão de no mínimo 450 ppm (1,5 vezes o nível do ano de 1900) e 55% de probabilidade de que serão 550 ppm. Ainda, segundo este relatório, haveria 75% de probabilidade de que o teor deste gás seja duplicado no ano de 2100, enquanto que Wuebles et al. (1984) admitem esta duplicação já em 2050.

Se o impacto devido aos outros gases estufa for igual ao do CO_2 , os estudos da NAS implicariam em que a duplicação de todos estes gases teria 98% de probabilidade de ocorrer no ano de 2050. Porém, as incertezas em relação aos outros gases são muito maiores que em relação ao CO_2 .

Por outro lado, muitas são as incertezas quanto ao impacto direto da duplicação dos "gases estufa". Se não houvesse quaisquer outros feitos, os físicos e climatólogos concordam que a temperatura média da Terra sofreria um acréscimo de 1°C por este fato. Entretanto, quando a Terra for aquecida, muitos outros parâmetros climáticos deverão sofrer modificações,

provavelmente amplificando os efeitos diretos dos "gases estufa" adicionais. Esses impactos indiretos são conhecidos como "efeitos climáticos retroativos" (climatic feedbacks).

Na Figura 3 podem ser vistos os principais "efeitos climáticos retroativos" conhecidos, segundo Hansen et. al. (1984). Uma atmosfera mais aquecida deverá reter mais 30% de vapor d'água, que é também um "gás estufa", ajudando a aquecer a Terra em $1,4^{\circ}\text{C}$. Neves e gelos flutuantes sofrerão fusão, diminuindo o "albedo" e, portanto, a intensidade de luz solar refletida, causando o aquecimento adicional de até $0,4^{\circ}\text{C}$. Embora as estimativas de outros pesquisadores sejam um pouco diferentes de Hansen et. al. (op. cit.), os climatólogos concordam que estes efeitos climáticos retroativos causariam um incremento no aquecimento global esperado. A influência das nuvens, tanto no que diz respeito a sua altura como extensão de sua cobertura, é mais duvidosa, embora pesquisas recentes sugiram que mudanças na altura e extensão de cobertura de nuvens influam no aquecimento da Terra em $0,5^{\circ}\text{C}$ a 1°C . Deste modo, a NAS concluiu que o aquecimento da Terra por duplicação de "gases estufa" poderia ser de $1,5^{\circ}\text{C}$ a $4,5^{\circ}\text{C}$.

MUDANÇAS PRETÉRITAS DE CLIMA E DE NÍVEL MARINHO

Através do passado geológico, o nível marinho tem sofrido subidas e descidas superiores a 300 m. Embora modificações das bacias oceânicas tenham desempenhado papel fundamental através dos tempos geológicos (Hays & Pitman III, 1973), as variações mais importantes do nível marinho foram ocasionadas por mudanças paleoclimáticas. Por exemplo, durante a última "idade do gelo" (18000 anos A.P.), a Terra exibia uma temperatura média cerca de 5°C inferior à atual, as geleiras recobriam grandes extensões do hemisfério norte e o nível

marinho estava mais de cem metros abaixo do atual (Donn et al., 1962).

Embora grandes volumes de gelo tenham sofrido fusão após o último estágio glacial, segundo Untersteiner (1975), as geleiras ainda existentes na Antártida e na Groenlândia, caso sofram fusão total, seriam suficientes para elevar o nível marinho em mais de 70 m. Porém, mesmo que a Terra se aquecesse substancialmente, seriam necessários dezenas de milhares de anos para a fusão total destas geleiras, fato que nunca chegou a ocorrer no Pleistoceno. Porém, diferentemente das outras geleiras pequenas que jazem sobre o continente, a calota glacial da Antártida Ocidental situa-se sobre substrato oceânico, sendo então mais vulnerável ao aumento da temperatura. Segundo Mercer (1970), esta calota glacial teria desaparecido completamente durante o estágio interglacial Sangamoniano (=Riss/Würm), há cerca de 100.000 anos A.P., quando a temperatura média foi apenas 1°C a 2°C superior à atual, elevando o nível marinho 5 a 7 m do nível atual.

Estudos baseados em registros de mareógrafos revelam uma tendência geral ascendente, na maioria das regiões costeiras do mundo, para os últimos 100 anos (1880-1980), em consonância com o aquecimento da Terra, em cerca de 0,4°C, neste intervalo de tempo (Fig. 4). Para a maior parte deste século, a subida média tem sido superior a 1 mm/ano. Meier (1984) atribuiu a subida ao degelo das geleiras da média latitude pelo "Efeito Estufa", enquanto que Gornitz et al. (1982) acreditam que este fenômeno tenha ocorrido principalmente ao "Efeito Estérico" (expansão das águas superficiais dos oceanos por aumento de temperatura). Deste modo, pode-se considerar que tanto as magnitudes quanto as causas dessas variações nos últimos 100 anos não são ainda bem conhecidas.

PROVÁVEIS MUDANÇAS FUTURAS DE CLIMA E DE NÍVEL MARINHO

O aquecimento global de poucos graus seria suficiente para a subida do nível marinho no futuro, como já aconteceu por várias ocasiões no passado. O mecanismo bem conhecido das águas superficiais de mar, como resultado de aquecimento, poderia ocasionar a ascensão de 0,5 m no próximo século (Hoffman et al., 1983). Segundo Meier (1984), as geleiras de altitude poderiam fundir-se adicionando de 10 a 30 cm ao nível marinho. Revelle (1983) estimou que a água do degelo da Groenlândia acrescentará outros 12 cm no próximo século, enquanto que, segundo Bindschadler (1985), esta subida seria de 10 a 25 cm. A Antártida poderá contribuir, tanto pela água do degelo como pelo deslizamento de geleiras para dentro dos oceanos. Segundo Thomas (1985), a Antártida poderia somar neste processo outros 24 cm.

Em 1983 surgiram 2 relatórios independentes, contendo estimativas sobre as prováveis subidas futuras do nível marinho. Segundo REVELLE (1983), os impactos combinados de expansão térmica, Calota da Groenlândia e geleiras de altitude poderiam ocasionar uma subida do nível marinho de 70 cm no próximo século, onde ele não incluiu a eventual participação da Calota Antártica. Hoffman et al. (1983) consideram pouco prática uma previsão simples de futura subida do nível marinho, tendo em vista a multiplicidade de fatores envolvidos e as incertezas existentes sobre cada um deles. Ao invés disso, eles estabeleceram estimativas máximas, médias e mínimas considerando todas as incertezas, incluindo o uso de combustíveis fósseis, absorção de CO_2 por processos naturais, futuras emissões de gases traços (outros "gases estufas" excetuando-se CO_2), aquecimento global resultante da duplicação de "gases estufa", difusão de calor para os oceanos e o impacto de gelo e neve. Eles

estimaram que, se todas as premissas para estimativas mínimas forem corretas, em relação ao nível do ano de 1980, subiria 13 cm em 2.025 e 38 em 2.075. Por outro lado, para estimativas máximas, o nível marinho subiria 55 cm em 2.025 e 211 em 2.075. Entretanto, como seria improvável que todas as estimativas mínimas e máximas estejam corretas, os autores concluíram pela conveniência de maior cautela, admitindo valores médios baixos e altos, optando, respectivamente, por 26 e 39 cm em 2.025 e 91 e 136 em 2.075 (Fig. 5).

Embora esses números sejam alarmantes, deve-se considerar que o modelo do "efeito estufa" é ainda bastante controverso. Quaisquer que sejam as causas da elevação do nível relativo do mar durante o último século, as evidências baseadas em mareógrafo são qualitativamente corretas e indicam uma subida progressiva do nível marinho, na maior parte do mundo, colocando a população litorânea mundial diante de uma difícil conjuntura.

ALGUMAS CONSEQÜÊNCIAS DE SUBIDA DO NÍVEL MARINHO

Antes de mais nada, devem advir conseqüências físicas e ambientais que podem ser resumidas em três categorias: retrogradação litorânea, inundações temporárias e intrusão salina. Destas, talvez as conseqüências mais sérias estariam vinculadas à inundação e erosão de milhares de quilômetros quadrados de planícies costeiras. A elevação do nível marinho modifica as relações de equilíbrio entre o perfil praiial e o nível das águas, pois o incremento de profundidade próximo à praia exigirá mais energia para transportar as areias de costa afora de volta às praias. Conseqüentemente, parte do material depositado por ondas de tempestade, durante o inverno, permanecerá em zona de costa afora, acarretando perda parcial das areias praiiais (Brunn, 1962; Schwartz & Fisher, 1979). Uma outra causa da erosão parcial pela

elevação do nível marinho é o retrabalhamento e conseqüente migração, continente adentro, de barreiras arenosas costeiras. A elevação do nível marinho provoca também o deslocamento do conteúdo salino dos aquíferos e estuários continente adentro. Como o nível do lençol freático, por exemplo, é definido pelo nível marinho, a subida deste ocasionará também a ascensão do limite água doce /água salgada, salinizando as águas captadas nas planícies através de poços.

Essas conseqüências físicas e ambientais, além de introduzir sérias perturbações nos ecossistemas costeiros, afetando profundamente a fauna e a flora, poderão causar sérios prejuízos econômicos e sociais às comunidades litorâneas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das metas essenciais para melhor compreensão das causas e conseqüências do "efeito estufa" deve estar na redução das incertezas ainda existentes sobre o fenômeno. Para isso, devem ser realizadas pesquisas mais detalhadas e criteriosas nos campos da climatologia, oceanografia, glaciologia, biogeoquímica, etc. Sem informações mais precisas, que permitam idealizar modelos cada vez mais funcionais, torna-se praticamente infactível a realização de prognósticos que permitam melhor visualizar as mudanças futuras de clima e nível marinho.

Por outro lado, se as populações futuras tiverem que enfrentar necessariamente o problema do recrudescimento do "efeito estufa", acompanhado de suas prováveis conseqüências, existem diversos métodos para mitigar os seus impactos físicos e ambientais. Uma opção consistiria na simples evacuação da área costeira afetada, através de uma lesgilação que proíba a construção de habitações e outros investimentos em zonas litorâneas. Outra opção consistiria na alimentação artificial de praias (beach nourishment) ou na construção de diversos tipos de estruturas de defesa, tais como quebra-mares e muros de proteção,

como acontece hoje em dia na Holanda . A terceira opção , segundo Newman & Fairbridge (1986) , consistiria na manipulação do ciclo hidrológico pelo homem que , assim , monitoraria a ascensão do nível marinho . Esta opção é possível , pois entre 1957 e 1982 a intervenção antrópica teria levado ao armazenamento , através de reservatórios e projetos de irrigação , sobre os continentes de volume de água potencialmente correspondente à elevação de nível marinho de 0,75 mm/ano .

Entretanto , as medidas preventivas são em geral economicamente justificáveis só em situações especiais , tais como nas proximidades de grandes centros urbanos ou como instalações de defesa de sítios históricos , áreas de proteção de espécies de animais ou vegetais em extinção , etc . Outros tipos de áreas , situadas principalmente longe de grandes centros populacionais , teriam que se ajustar às conseqüências da elevação do nível marinho , seja ou não devido ao "efeito estufa".

REFERÊNCIAS

- BINDSCHADLER , R. (1985) Contribution of the Greenland Ice Cap to changing sea-level . In : MEIR , M. F. *glaciers , ice sheets and sea-level* . Washington , National Academy Press .
- BRUUN , P. (1962) Sea-level rise as cause of shore erosion . *Journal of waterways and Harbors division* , 88 : 117-130 .
- CUNNOLD , D.M. ; PRINN , R.G. ; RASMUSSEN , R.A. ; SIMMONDS , P.G. ; ALYEA , F.N. ; CARDELINO , C.A. ; CRAWFORD , A.J. ; FRASER , P.J. ; ROSEN , R.D. (1983a) The atmospheric lifetime experiment 3 - Lifetime methodology and application to 3 years of CFC1 3 data . *Journal fo Geophysical Research*, 88(C13): 8379-8400 .
- CUNNOLD , D.M. ; PRINN , R.G. ; RASMUSSEN , R.A. ; SIMMONDS , P.G. , ALYEA