

# EFEITOS DO AUMENTO DO DIÓXIDO DE CARBONO, METANO E ÓXIDO NITROSO SOBRE A MÉDIA GLOBAL ANUAL DO BALANÇO DE RADIAÇÃO E DA TEMPERATURA DO AR PRÓXIMO À SUPERFÍCIE

*Elisabete Caria Moraes<sup>1</sup>  
Sérgio Henrique Franchito<sup>2</sup>  
Vadlamudi Brahmananda Rao<sup>2</sup>*

**RESUMO:** Conseqüências do aumento dos gases do efeito estufa sobre a temperatura do ar próximo à superfície foram investigadas utilizando o modelo estatístico dinâmico (MED). As parametrizações dos processos de transferência radiativa inclusos neste modelo são sofisticadas e computacionalmente eficazes. As modificações nos saldos de radiação devido aos experimentos de duplicação e quadruplicação do CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, e o cenário A1FI apresentado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas que prevê para o ano de 2100 o aumento antropogênico das concentrações dos gases estufa CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e O<sub>3</sub> troposférico provocaram os maiores aumento na temperatura do ar próximo à superfície para as regiões polares. As mudanças na temperatura do ar próximo à superfície foram controladas principalmente pelo aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, sendo suas mudanças similares nos casos dos experimentos de previsão dos gases segundo o cenário A1FI e 4xCO<sub>2</sub>, e 4 x CH<sub>4</sub> e 2x N<sub>2</sub>O.

**ABSTRACT:** Consequences of the increased levels of atmospheric greenhouse gases in the mean annual surface air temperature were investigated using the statistical-dynamical climate model (MED). This model has sophisticated and numerically efficient parameterizations of radiative transfer processes. The modifications in the net radiation regarding the experiments of doubling and quadruplication of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, and concentration increase of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and tropospheric O<sub>3</sub> predicted for year 2100 according to the scenario A1FI of the Intergovernmental Panel on Climate Change indicated that air temperature close to the ground was increased with higher values over polar region in both hemispheres. The changes in surface air temperature are controlled mainly by the increase in CO<sub>2</sub> concentration, and its changes are similar in the cases of the predicted conditions for A1FI and 4xCO<sub>2</sub>, and 4 x CH<sub>4</sub> and 2x N<sub>2</sub>O.

**Palavras-chave:** mudanças climáticas, transferência radiativa, efeito estufa.

## INTRODUÇÃO

Um dos principais alvos de pesquisa sobre mudanças climáticas está relacionado com as alterações ocasionadas pelas ações antropogênicas no uso da terra e na emissão dos gases do efeito estufa.

As emissões de gases do efeito estufa, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e clorofluorcarbonetos (CFCs) são decorrentes de mudanças do uso da terra (desflorestamento, queima de biomassa, atividades agrícolas, etc.), queima de combustíveis fósseis e

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Cx. Postal 515 – 12201-970 – São José dos Campos, SP, Brasil

<sup>1</sup> Divisão de Sensoriamento Remoto - DSR: (12) 3945.6463; bete@dsr.inpe.br

<sup>2</sup> Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC: (12) 3945.6649; {fran, vbrao}@cptec.inpe.br

processos industriais. A ação antropogênica destes gases atua como forçante radiativa, alterando o balanço de radiação e, conseqüentemente, o balanço climático.

Esta evidência originou a necessidade do desenvolvimento de instrumentos legais internacionais sobre a questão da mudança climática, acarretando a criação da Convenção – Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, e a adoção do Protocolo de Kyoto. Este estabelece, para os países que o assinaram, metas de redução da liberação dos gases do efeito estufa, objetivando a estabilização de suas concentrações na atmosfera (Miguez, 1999).

A avaliação das mudanças de concentrações dos gases do efeito estufa é muito complexa e incerta, pois envolve o conhecimento dos diversos biomas que compõem suas fontes e sumidouros, bem como o conhecimento dos seus tempos de residência na atmosfera (IPCC 2001).

O efeito do aumento destes gases atmosféricos sobre o clima é proveniente da interação destes, que são radiativamente ativos espectralmente, com a radiação eletromagnética. Estas interações alteram os balanços das radiações solar e terrestre armazenadas no sistema terra-atmosfera, que são primordiais na determinação do clima global.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, através da utilização do MED com a vegetação e os processos de transferência radiativa bem representados, a influência do aumento das concentrações dos gases do efeito estufa antropogênicos sobre a média global anual do balanço radiativo e sobre as médias zonal e global da temperatura média anual do sistema terra-atmosfera. Os experimentos simularam a duplicação e a quadruplicação individual das concentrações dos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O em relação ao ano de 2000, e o aumento das concentrações dos gases estufa projetado pelo cenário A1FI para o ano de 2100 pelo IPCC (2001)

## **METODOLOGIA**

Os modelos de transferência radiativa solar e termal (Chou e Suarez, 1999 e 1994) são baseados em parametrizações precisas e detalhadas dos processos de transferência radiativa, e mostraram-se computacionalmente eficientes. Estes modelos foram implementados em um MED com vegetação acoplada (Moraes, 2004), objetivando simular o clima médio zonal anual e os possíveis impactos climáticos provenientes de ações antropogênicas.

Nos processos de transferência radiativa as interações da radiação solar e infravermelha termal com a atmosfera consideram os principais gases do efeito estufa, as nuvens e os aerossóis. A radiação solar é absorvida, principalmente, pelo vapor d'água e O<sub>3</sub>, mas também são considerados as absorções pelos gases CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, e o processo de transferência radiativa para a radiação termal considera a absorção pelos gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> e CFCs.

De forma geral, o MED conseguiu reproduzir bem as características médias zonais anuais do clima para o ano de 2000, quando comparados com os dados de reanálise do *National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research* (Moraes et al., 2004). Para a simulação do clima presente, consideraram-se as concentrações dos gases do efeito estufa para o ano 2000 apresentadas no IPCC (2001), as quais se encontram descritas na Tabela 1. Em vista disso, todos os experimentos de aumento nas concentrações dos gases do efeito estufa são avaliados comparando seus resultados com aqueles provenientes da simulação do clima presente (atual).

Tabela 1 – Concentração dos gases estufa para o ano 2000 e a prevista pelo cenário A1FI para 2100

Gases do Efeito Estufa	Concentração do ano 2000	Concentração do cenário 2100
CO <sub>2</sub>	360 ppm	970 ppm
CH <sub>4</sub>	1760 ppb	3730 ppb
N <sub>2</sub> O	316 ppb	460 ppb
Perfil O <sub>3</sub> troposférico	Mc Clatchey et al. (1972)	62%

Na realização dos experimentos que simulam o aumento dos gases do efeito estufa são introduzidas no programa computacional as modificações nas concentrações dos gases individualmente, ou seja, a duplicação e quadruplicação do CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, e aumento projetado pelo cenário A1FI para 2100. Na execução do programa, para cada experimento, os seis primeiros meses são executados sem a inclusão da vegetação e da nova versão do modelo de transferência radiativa, e os seis meses seguintes, necessários para o alcance do equilíbrio climático, são executados com as modificações. Os resultados analisados são apresentados em termos dos desvios existentes entre a simulação do experimento e a respectiva simulação do clima atual (situação perturbada menos situação atual).

## RESULTADOS

Na simulação do aumento dos gases do efeito estufa antropogênicos verificou-se uma pequena redução no balanço médio global anual da radiação solar na superfície. Esta redução, apresentada na Tabela 2, foi ocasionada pelo fato da atmosfera tornar-se mais opaca absorvendo mais a radiação solar e, portanto, menos energia solar atinge à superfície. A maior atenuação foi observada no experimento de quadruplicação do CO<sub>2</sub>. Moraes et al. (2005) mostraram que a maior redução no balanço da radiação solar induzida pelo aumento da concentração dos gases do efeito estufa projetado pelo cenário A1FI para 2100 foi devido ao aumento de 62% da concentração do O<sub>3</sub> troposférico.

A tabela 2 apresenta os resultados das simulações do aumento dos gases do efeito estufa antropogênicos sobre o balanço médio global anual da radiação infravermelha termal na superfície. Os aumentos ocasionaram uma maior absorção atmosférica da radiação termal emitida pela superfície, e consequentemente, a atmosfera se aqueceu mais e emitiu mais energia termal em direção à superfície (contra-irradiação), acentuando assim o efeito estufa. Contudo, o aumento na contra-irradiação é maior do que o aumento do fluxo termal emitido pela superfície reduzindo o saldo de radiação infravermelha termal na superfície. Este aspecto também foi observado nos trabalhos de Manabe e Wetherald (1980) e de Chou e Peng (1983). O maior desvio ( $2,05 \text{ Wm}^{-2}$ ) foi observado para o experimento de quadruplicação da concentração de  $\text{CO}_2$ , seguido do experimento de aumento da concentração dos gases do efeito estufa projetado pelo cenário A1FI para 2100, cujo desvio foi de ( $1,50 \text{ Wm}^{-2}$ ).

Devido aos gases do efeito estufa produzirem as maiores influências na faixa do espectro infravermelho termal, os desvios no saldo de radiação na superfície apresentaram as mesmas tendências observadas na análise do balanço da radiação infravermelha termal, reduzindo este saldo em 13%, quando o  $\text{CO}_2$  foi quadruplicado, e em 11,85% quando se utilizava o aumento da concentração dos gases do efeito estufa projetado pelo cenário A1FI para 2100.

Tabela 1 – Desvios médios globais anuais no balanço de radiação induzidos pelo aumento da concentração dos gases do efeito estufa

Média Global Planetária	Atual	Experimentos de aumento da concentração do gás						
		2xCH <sub>4</sub>	4xCH <sub>4</sub>	2xN <sub>2</sub> O	4xN <sub>2</sub> O	2xCO <sub>2</sub>	4xCO <sub>2</sub>	C.2100
<b>Radiação Solar</b>	desvio	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,07	-0,17	-0,11
220,6 $\text{Wm}^{-2}$	%	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,08	-0,05
<b>Infravermelho Termal</b>	desvio	0,11	0,28	0,29	0,73	1,02	2,05	1,50
- 207 $\text{Wm}^{-2}$	%	-0,05	-0,13	-0,14	-0,35	-0,49	-0,99	-0,73
<b>Saldo de Radiação</b>	desvio	0,11	0,28	0,29	0,73	0,95	1,88	1,61
13,6 $\text{Wm}^{-2}$	%	0,82	2,07	2,12	5,40	6,99	13,84	11,85

O aumento da concentração dos gases do efeito estufa alterou os saldos de radiação e para que haja a restauração do equilíbrio climático, a superfície e a atmosfera se aquecem. A Figura 1 mostra os desvios médios anuais zonais da temperatura do ar próximo à superfície. Os maiores desvios foram observados com a quadruplicação do  $\text{CO}_2$ , que apresentou desvios similares quando se simulou o aumento da concentração dos gases do efeito estufa projetado pelo cenário A1FI para 2100. Verificou-se que os maiores aumentos, decorrentes dos diversos aumentos da concentração dos gases estufa maiores na atmosfera, ocorrem nas regiões polares, sendo os maiores desvios observados no

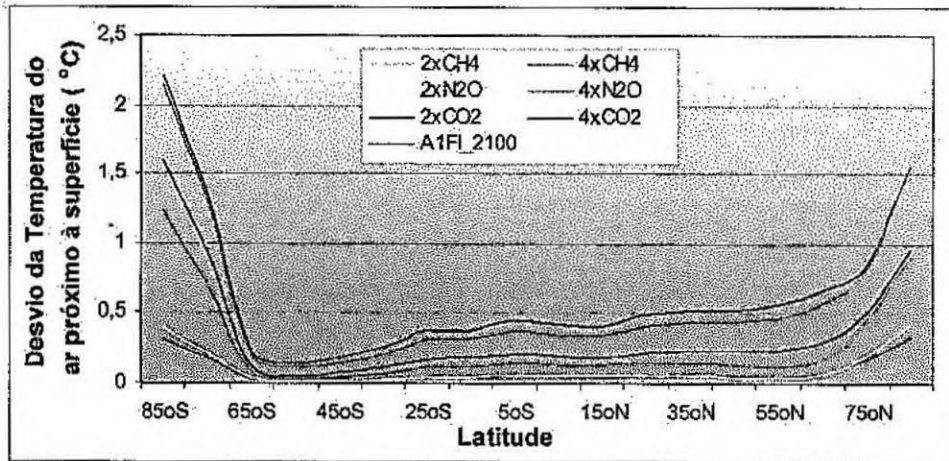
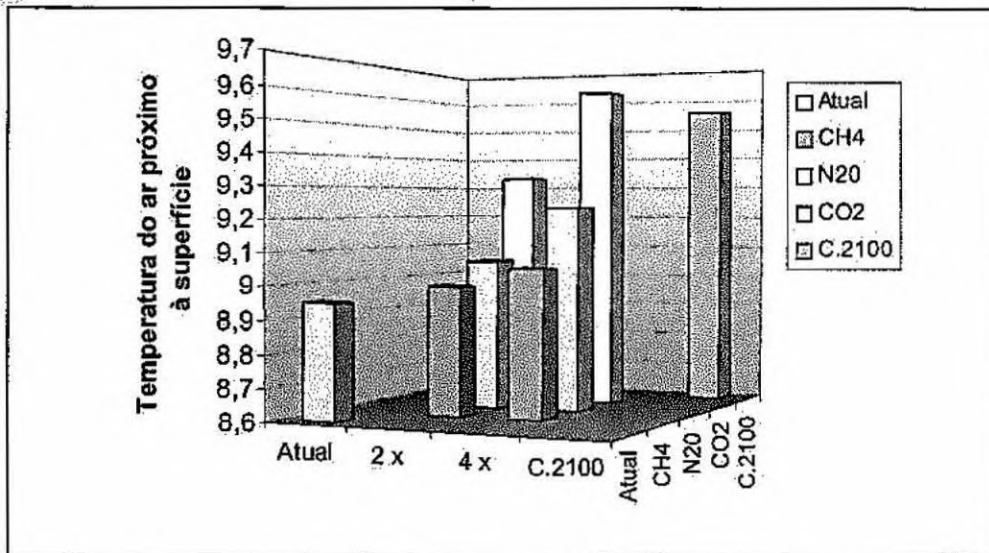


Figura 1 – Média zonal anual da temperatura do ar próximo à superfície

A Figura 2 mostra os desvios médios anuais globais da temperatura do ar próximo à superfície. O maior desvio foi observado no experimento de simulação da quadruplicação do CO<sub>2</sub>, que apresentou um aumento percentual de 7,25%. Esta figura mostra que a ordenação decrescente do aumento da temperatura do ar próximo à superfície ocorreu segundo os experimentos de aumento da concentração dos gases do efeito estufa projetado pelo cenário A1FI para 2100, de duplicação de CO<sub>2</sub>, de quadruplicação de N<sub>2</sub>O, de duplicação de N<sub>2</sub>O, de quadruplicação de CH<sub>4</sub> e de duplicação de CH<sub>4</sub>, cujos percentuais de aumento foram, respectivamente, 6,6%; 4,2%; 3,1%; 1,2%; 1,0% e 0,4%.



Figuras 2 – Médias globais anuais da temperatura do ar próximo à superfície induzidas pelos aumentos nas concentrações dos gases do efeito estufa

## CONCLUSÃO

Foi verificado através dos experimentos de sensibilidade do clima à mudança dos gases do efeito estufa, que o efeito radiativo destes gases apresenta uma realimentação positiva no armazenamento de energia e, por consequência, o aumento da temperatura do planeta.

Nos experimentos de duplicação e quadruplicação de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, e de projeção para 2100 do aumento antropogênico nas concentrações dos gases estufa definidos para o cenário A1FI pelo IPCC (2001), verificou-se que as alterações no balanço radiativo provocaram aumentos na temperatura do ar próximo à superfície, sendo estes mais acentuados nas regiões polares. As maiores alterações foram verificadas com a quadruplicação da concentração de CO<sub>2</sub> e com o aumento da concentração previsto no cenário A1FI para 2100. Os aumentos médios globais na temperatura do ar próximo à superfície foram similares nas simulações de duplicação do N<sub>2</sub>O e de quadruplicação do CH<sub>4</sub>.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chou, M.-D. and L. Peng, 1983: *A parameterization of the absorption in the 15mm CO<sub>2</sub> spectral region with application to climate sensitivity studies*. J. of the Atmospheric Science, 40, 2183-2192.

Chou, M.-D. and M. J. Suarez, 1994: *An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models*. Tech. Report Series on Global Modeling and Data Assimilation, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Tech. Memo. 104606, v. 3, 102 pp.

Chou, M. -D., 1999: Atmospheric solar heating in mirror absorption bands. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 10, 511-528.

Chou, M.-D. and M. J. Suarez, 1999: *A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies, Goddard Space Flight Center, Greenbelt. NASA Tech. Mem. (NASA/TM-1999-104606)*, vol. 15, 42 p.

Houghton, J.T., Y. Ding., D. J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 pp.

Manabe, S. and R.T. Wetherald, 1980: *On the distribution of climate change resulting from an increase in CO<sub>2</sub> content of the atmosphere*. J. of the Atmospheric Sciences, 37, 99-118.

Moraes, E. C., S. H. Franchito and V. B. Rao, 2004: *Effects of biomass burning in Amazonia on climate: a numerical experiment with a statistical-dynamical model*. J. of Geophysical Research., 109, D05109, doi:10.1029/2003JD003800, 1-12.

Moraes, E. C., S. H. Franchito and V. B. Rao, 2005: *Evaluation of surface air temperature change due to the greenhouse gases increase with a statistical-dynamical model*. J. of Geophysical Research., 110, D24109, doi:10.1029/2004JD005679, 1-8.