



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Meteorologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LAYRSON DE JESUS MENEZES GONÇALVES

VALIDAÇÃO E ESTIMATIVA DO AQUECIMENTO GLOBAL DEVIDO A UMA NOVA
PARAMETRIZAÇÃO DA EMISSIVIDADE DA ATMOSFERA EM FUNÇÃO DAS
FORÇANTES RADIATIVAS GERADA POR AUMENTO DOS GASES DO EFEITO
ESTUFA UTILIZANDO UM MODELO CONCEITUAL GLOBAL (GREB)

Nº: 355

BELÉM-PA
2015

LAYRSON DE JESUS MENEZES GONÇALVES

VALIDAÇÃO E ESTIMATIVA DO AQUECIMENTO GLOBAL DEVIDO A UMA NOVA
PARAMETRIZAÇÃO DA EMISSIVIDADE DA ATMOSFERA EM FUNÇÃO DAS
FORÇANTES RADIATIVAS GERADA POR AUMENTO DOS GASES DO EFEITO
ESTUFA UTILIZANDO UM MODELO CONCEITUAL GLOBAL (GREB)

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências
da Universidade Federal do Pará – UFPA, em
cumprimento as exigências para obtenção de grau de
bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Yoshio Kubota

BELÉM-PA
2015

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA

Gonçalves, Layrson de Jesus Menezes, 1991-

Validação e estimativa do aquecimento global devido a uma nova parametrização da emissividade da atmosfera em função das forçantes radiativas gerada por aumento dos gases do efeito estufa utilizando um modelo conceitual global (GREB) / Layrson de Jesus Menezes Gonçalves. – 2015.

43 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Paulo Yoshio Kubota

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Meteorologia, Belém, 2015.

1. Mudanças climáticas. 2. Efeito estufa. 3. Aquecimento global. I. Título.

LAYRSON DE JESUS MENEZES GONÇALVES

VALIDAÇÃO E ESTIMATIVA DO AQUECIMENTO GLOBAL DEVIDO A UMA NOVA
PARAMETRIZAÇÃO DA EMISSIVIDADE DA ATMOSFERA EM FUNÇÃO DAS
FORÇANTES RADIATIVAS GERADA POR AUMENTO DOS GASES DO EFEITO
ESTUFA UTILIZANDO UM MODELO CONCEITUAL GLOBAL (GREB)

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
faculdade de Meteorologia do Instituto de Geociências
da Universidade Federal do Pará – UFPA, em
cumprimento as exigências para obtenção de grau de
bacharel em Meteorologia.

Data da aprovação: __/__/__

Conceito: _____

Banca examinadora:

Prof. Paulo Yoshio Kubota - Orientador
Doutora em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof^a. Maria Aurora Santos da Mota - Membro
Doutora em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

A minha mãe,
minha primeira e grande professora.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar saúde e força para alcançar meus objetivos e por me guiar neste caminho que tenho enorme satisfação em seguir;

A minha mãe (Maria Lúcia) por me dar todo apoio do mundo para alcançar esse e muitos outros objetivos. "Mãe esta vitória é muito mais sua do que minha!".

Aos meus familiares que torceram por mim. Em especial aos que moram comigo, minha irmã (Larissa), vó (Conceição), primos (Glauco, Benedito)

A minha namorada (Clara Mello) que ao contrário do que muitos pensavam nunca me atrapalhou em nada e sempre me apoiou em minhas decisões;

Ao professor Dr. Edson Rocha que me concedeu a oportunidade de trabalhar como bolsista de Iniciação Científica por dois anos, assim me ajudando a crescer cientificamente e profissionalmente;

A professora Dra. Aline Meiguins que sempre teve paciência comigo. Foi minha orientadora e conselheira, diria que é minha mãe no meio científico;

Ao professor Dr. Paulo Kubota por me orientar neste trabalho que é algo essencial para a obtenção do grau de bacharel em Meteorologia;

Os professores em geral que de alguma forma me ajudaram a adquirir conhecimento e experiência no ramo na meteorologia;

Aos meus amigos de 2011 (Thallis Sampaio, Rennon Oliveira, Robson Castro e Rafael Sacramento), 2012 (Cleber Assis, Edivaldo Serrão e Romero Wanzeler) e 2013 (Felipe Menezes, Felipe Higuchi, João Paulo Pedrosa, Elton Abreu e Lucas Monteiro) por me proporcionarem momentos felizes, me apoiarem, torcerem e acreditarem em mim;

E a todos os demais do Laboratório de Estudos e Modelagem Hidroambientais (LEMHA) e da turma de 2011 que de alguma forma influenciaram para que eu chegasse até aqui.

“O rio atinge seus objetivos, porque
aprendeu a contornar seus obstáculos.”

Lao Tsé

RESUMO

Atualmente, o interesse sobre os efeitos das mudanças climáticas sobre as questões socioeconômicas tem adquirido muita importância tanto na comunidade científica como no meio político. Segundo o 4 e 5 relatórios do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), ainda existe grandes incertezas nas magnitudes das forçantes radiativas que induzem a mudança no clima global. Estas incertezas, em geral estão relacionadas às estimativas futuras das emissões dos gases do efeito estufa. Neste trabalho aborda-se a influência dos gases do efeito estufa no aumento da temperatura global, através da implementação de uma nova parametrização da emissividade da atmosférica em função da forçante radiativa devido à presença destes gases na atmosfera. Os resultados obtidos mostram que o Modelo Conceitual Global simula bem a mudança da temperatura de superfície com o aumento da concentração dos gases do efeito estufa. Isso demonstra que a implementação da parametrização da emissividade em função da concentração dos gases do efeito estufa torna o modelo Conceitual Global uma ferramenta simples e com um custo computacional baixo, para estimar a mudança de temperatura de superfície.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Efeito estufa. Forçante radiativa.

ABSTRACT

Currently, the interest on the effects of climate change on socio-economic issues has gained much importance in both the scientific community and the political environment. According to 04 and 05 reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), there is still great uncertainty in the magnitude of the radiative forcing that induce global climate change. These uncertainties in general are related to future estimated emissions of greenhouse gases. In this paper addresses is the influence of greenhouse gases on global temperature increase through the implementation of a new parameterization of the emissivity of air depending on the radiative forcing due to the presence of these gases in the atmosphere. The results show that the Global Conceptual Model has a good accuracy simulating the change of surface temperature with increasing concentration of greenhouse gases. This shows that the implementation of the parameterization of the emissivity due to the concentration of greenhouse gases makes the conceptual Global model a simple tool with a low computational cost, to estimate the surface temperature change.

Key words: Climate change. Greenhouse. Radiative forcing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Condições de contorno do GREB	20
Figura 2 – Processos físicos do GREB	21
Figura 3 – Áreas do globo onde foram obtidas simulações de temperatura média	26
Figura 4 – Temperatura média global obtida através de simulação na literatura aumentando a concentração dos gases (a) CO ₂ , (b) CH ₄ e (c) N ₂ O	27
Figura 5 –Emissões Globais de Dióxido de Carbono CO ₂ relacionadas do setor de energia e indústria. Cenários e Base de Dados SRES (1990 = 1)	27
Figura 6 –Médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos (relativas a 1980-99) para os cenários A2, A1B e B1, mostradas comocontinuações das simulações do século XX.	28
Figura 7 –Padrão global de temperatura, à esquerda (a) IPCC verão e (c) IPCC inverno, à direita (b) GREB verão e (d) GREB inverno. ...	29
Figura 8 –Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CO ₂ : (a) 2x CO ₂ Verão, (b) 2x CO ₂ Inverno, (c) 4x CO ₂ Verão e (d) 4x CO ₂ Inverno.....	33
Figura 9 –Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CH ₄ : (a) 2x CH ₄ Verão, (b) 2x CH ₄ Inverno, (c) 4x CH ₄ Verão e (d) 4x CH ₄ Inverno.	34
Figura 10 –Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de N ₂ O: (a) 2x N ₂ O Verão, (b) 2x N ₂ O Inverno, (c) 4x N ₂ O Verão e (d) 4x N ₂ O Inverno.....	35
Figura 11 –Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CFC11: (a) 2x CFC11 Verão, (b) 2x CFC11 Inverno, (c) 4x CFC11 Verão e (d) 4x CFC11 Inverno.	36
Figura 12 –Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CFC12: (a) 2x CFC12 Verão, (b) 2x CFC12 Inverno, (c) 4x CFC12 Verão e (d) 4x CFC12 Inverno.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CGCM	- Modelo Climático de Circulação Geral
GREB	- Modelo global climático conceitual
ppbv	- Partículas por bilhão de volume
ppmv	- Partículas por milhão de volume

LISTA DE SIMBOLOS

CFC	- Hidrocarbonetos Halogenados
CH ₄	- Metano
CO ₂	- Dióxido de Carbono
H ₂ O	- Vapor de Água
N ₂ O	- Óxido Nitroso
°C	- Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	JUSTIFICATIVA.....	16
3	OBJETIVO.....	17
4	METODOLOGIA.....	18
4.1	Descrição do modelo GREB	18
4.2	Função de emissividade GREB.....	23
4.3	Implementação das equações da nova parametrização da emissividade da atmosfera em função da concentração dos gases do efeito estufa.....	24
4.4	Descrições dos experimentos.....	25
4.5	Métodos de análise dos resultados.....	26
5	RESULTADOS.....	31
5.1	Análises das médias globais e regionais do aumento da temperatura em simulações longas de 100 anos.....	31
5.2	Análise do padrão global do aumento da temperatura	33
6	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

O aumento de fenômenos meteorológicos severos (desastres naturais) relacionados às mudanças climáticas tem se tornado frequente em várias regiões do planeta nos dias atuais. Um parâmetro que mede o quanto o clima está mudando é a temperatura média global da atmosfera (IPCC, 2007). Sobre esta variável atmosférica atuam diversos processos físicos que influenciam a sua tendência de aumento e diminuição, sendo que as forçantes radiativas as principais forças que impactam diretamente a temperatura global (IPCC, 2013). No entanto, as forçantes radiativas tem relação direta com os gases presentes na atmosfera, principalmente os chamados gases do efeito estufa.

Diversas atividades humanas (queima de combustível, queimadas, atividade industriais, pecuária, desmatamento, etc.) geram as grandes quantidades de emissões dos principais gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e hidrocarbonetos halogenados (CFCs). As concentrações de gases do efeito estufa na atmosfera têm aumentado muito desde a Revolução Industrial (IPCC, 2007, 2013), trazendo mudanças importantes na composição da atmosfera e contribuindo significativamente para o aquecimento global.

O efeito estufa atmosférico provocados por estes gases, é baseado em um mecanismo básico, pelo qual a radiação solar (ondas curtas) absorvida pela superfície do planeta e reemitida através de radiação térmica (ondas longas) e esta radiação térmica é absorvida pelos gases do efeito estufa aumentando os movimentos vibracionais e rotacionais das moléculas e esses gases por sua vez também passam a irradiar na forma de ondas longas. A opacidade dos gases de efeito estufa, vapor de água (H_2O) e de nuvens presentes na atmosfera geram um aquecimento adicional da superfície. Isto mantém o planeta Terra muito mais quente em relação à temperatura equivalente calculada através da teoria de emissão de Planck (LIU, 2002). O princípio do efeito estufa é um conceito simples, e foi primeiro descrito pelo matemático e físico francês Joseph Fourier (FOURIER, 1824). Fourier concluir que a maior parte da radiação térmica emitida pela superfície da Terra era absorvida nas camadas da atmosfera, e que uma parte da radiação absorvida era depois reemitida para a superfície, proporcionando o aquecimento

adicional sobre e acima da superfície, além do aquecimento direto por radiação solar.

Descrito por Lacis et al. (2010), o efeito estufa terrestre consiste de dois componentes, a primeira é composta dos gases de efeito estufa sem condensação (CO_2 , CH_4 , N_2O e variação dos CFCs), e a segunda componente, composto pelos efeitos de retroalimentação (feedback) de ação rápida devido ao vapor de água e nuvens. O ponto principal é que os gases de efeito estufa sem condensação não se condensam, nem precipitam na atmosférica e aliada também ao fato de que estes gases tendem a ter reação química lenta. Uma vez injetada na atmosfera, estes gases permanecem na atmosfera por um período muito longo. Para o caso do CO_2 e os CFCs este período de tempo é da ordem de séculos, portanto, a estimativa correta das taxas de emissão destes gases é importante para poder estimar a evolução das suas concentrações na atmosfera da Terra.

Os componentes de feedback rápidos, como o vapor de água e nuvens, ajustam-se rapidamente as condições atmosféricas predominantes, através dos processos de condensação e precipitação. Por serem forte absorvedores de radiação térmica, o vapor de água e as nuvens são de fato os principais contribuintes do efeito estufa terrestres. No entanto, a energia solar absorvida energiza a superfície e atmosfera e aquece o ar próximo à superfície através do efeito estufa da Terra. O aquecimento devido à radiação solar é estabilizado através do balanço entre a superfície (oceano+continente) e as camadas da atmosfera onde estão os gases de efeito estufa sem condensação GEE, isso sustenta a estrutura da temperatura atmosférica.

Existem várias formas de examinar como as diferentes forças contribuem para as alterações climáticas. Em princípio, as observações da resposta do clima a um único fator pode mostrar diretamente o impacto desse fator, porém, os modelos climáticos também podem ser usados para estudar o impacto de um único fator. Na prática, no entanto, é geralmente difícil de encontrar medidas de determinadas variáveis que são influenciadas por um único fator, e que não seja computacionalmente proibitivo simular a resposta individual de cada elemento de interesse. Daí várias métricas intermediárias entre causa e efeito são usados para fornecer estimativas do impacto de fatores individuais no clima, com aplicações tanto na ciência e na política (FUGLESTVEDT et al., 2003; LAUDER et al., 2013; O'NEILL, 2000;

SMITH;WIGLEY,2000). O forçamento radiativo é um dos indicadores mais utilizados nas maiorias das métricas. Ou seja, determina-se a mudança da temperatura média global em função do forçamento radiativo.

Forçante Radiativa é a variação líquida no balanço energético do sistema terrestre devido a alguma perturbação imposta. É geralmente expressa em watts por metro quadrado em média ao longo de um determinado período de tempo e quantifica o desequilíbrio de energia que ocorre quando há uma mudança neste sistema terrestre (IPCC, 2013).

Embora geralmente difícil de observar, o forçamento radiativo calculado fornece uma base para a comparação quantitativa simples de alguns aspectos da resposta potencial do clima impostas a diferentes agentes, em especial da temperatura média global (HANSEN et. al., 2005), e, portanto, é muito utilizada na comunidade científica. Forçamento radiativo é muitas vezes apresentada como o valor devido a mudanças entre dois momentos específicos (épocas), tais como pré-industrial para a atual, enquanto que a sua evolução no tempo fornece uma descrição completa do comportamento das mudanças provocadas devido a algum agente modelador (IPCC, 2013).

A justificativa para a realização deste trabalho consiste no fato da influência dos gases do efeito estufa, vapor de água e nuvens no forçamento radiativo da atmosfera terrestre ter ainda grandes incertezas, pois estes elementos alteram a composição da atmosfera e conseqüentemente a sua emissividade Liou (2002). Segundo o IPCC (2013), estas incertezas na determinação da evolução temporal das forçantes radiativas são grandes apesar dos avanços nas técnicas de medidas observacionais e na modelagem dos processos radiativos, pois muitas destas incertezas estão atribuídas à emissão dos gases do efeito estufa através das atividades humanas.

Baseado na justificativa e nas informações apresentadas no IPCC (2013) propõe-se neste trabalho a utilização de um modelo global climático conceitual (GREB) descrito por Dommengot (2011), na qual será implementada uma nova parametrização de emissividade que inclua os efeitos dos gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O e hidrocarbonetos halogenados), em função das forçantes radiativas.

2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que geralmente os modelos globais como o Modelo Climático de Circulação Geral (CGCM) necessitam de altos recursos computacionais eles acabam sendo restrito a institutos com alto poder aquisitivo, daí surge à idéia de ajustar um modelo simplificado como no caso deste trabalho o modelo *Globally Resolved Energy Balance* (GREB) para verificar se sua resposta é coerente como os modelos mais sofisticados e assim poder ser implantado em universidades e institutos que não tem supercomputadores.

3 OBJETIVO

Verificar a influencia dos gases do efeito estufa no aumento da temperatura global, através da implementação de uma parametrização da emissividade da atmosférica que leva em conta a forçante radiativa devido à presença destes gases na atmosfera.

4 METODOLOGIA

Neste trabalho será utilizado o modelo global climático conceitual (GREB), como uma ferramenta para analisar os impactos dos gases do efeito estufa no balanço de energia e consequentemente no aquecimento regional e global. O modelo Greb original, não possui estas funcionalidades, portanto a primeira parte deste trabalho será implementar uma parametrização de albedo de superfície mais realista porém bem simples e uma parametrização de onda curta e longa simplificada que considere o novo albedo e as concentrações dos gases do efeito estufa em sua parametrização. A segunda parte consiste nas simulações por um período de 100 anos, estas simulações estão separadas por experimentos onde os gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O e CFCs), são aumentando em 2 e 4 vezes a sua concentração. Com relação ao albedo de superfície, neste trabalho introduzimos uma variação do albedo em função das classes de vegetação do modelo *simplified simple biosphere model* (SSiB) (XUE, 1991) para o globo (os valores do albedo para cada classe de vegetação foram obtida através da tabela do NOAA-LSM V. 3.2 (EK, et al., 2003; CHEN; DUDHIA, 2001).

4.1 Descrição do modelo GREB

O modelo conceitual GREB se utiliza de uma grade regular na projeção lat-lon na horizontal para a discretização das equações governantes, com relação à estrutura de grade na vertical as camadas atmosféricas são representadas por uma única camada com espessura em torno de 8000 km. Sobre este domínio de grade e utilizando o método de diferenças finitas as equações governantes do modelo são discretizadas. Estas equações são representadas pelas simplificações das equações de conservação para a energia e vapor de água.

A temperatura atmosférica T_{atmos} é uma variável prognostica representada pela equação:

$$\gamma_{atmos} \frac{\partial T_{atmos}}{\partial t} + \gamma_{atmos} \left[-u \frac{\partial T_{atmos}}{\partial x} - v \frac{\partial T_{atmos}}{\partial y} + K \left(\frac{\partial^2 T_{atmos}}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 T_{atmos}}{\partial^2 y} \right) \right] + F_{sense} + F_{a_{termal}} + Q_{latent} \quad (1)$$

Onde, κ é o coeficiente de difusão atmosférica, os termos não lineares que contribuem na tendência de temperatura da atmosfera são: F_{sense} é a tendência devido à troca de calor sensível com a superfície, $F_{a_{termal}}$ é a tendência devido a radiação térmica líquida, Q_{latent} é a tendência devido a liberação de calor latente através do processo de condensação do vapor de água atmosférico. Os termos que contribuem para a tendência de temperatura são os termos lineares de difusão e advecção de temperatura. A constante γ_{atmos} é a capacidade de calor da atmosfera para uma coluna de ar de 5000 metros.

A equação prognostica para a tendência de umidade específica da atmosfera q_{ar} é representada pela equação

$$\frac{\partial q_{ar}}{\partial t} = -u \frac{\partial q_{ar}}{\partial x} - v \frac{\partial q_{ar}}{\partial y} + \kappa \left(\frac{\partial^2 q_{ar}}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 q_{ar}}{\partial^2 y} \right) + \Delta q_{eva} + \Delta q_{precip} + \Delta q_{correção} \quad (2)$$

Onde, q_{ar} é a umidade específica da atmosfera, κ é o coeficiente de difusão atmosférica, Δq_{eva} é o termo que representa a tendência de ganho ou perda de umidade da atmosfera devido a evaporação de superfície, Δq_{precip} é o termo que representa a tendência de umidade da atmosfera devido ao processo de condensação ou precipitação, os outros termos são referentes à circulação atmosférica (difusão e advecção isotrópica) e o termo de correção de fluxo $\Delta q_{correção}$.

As componentes da velocidade zonal e meridional do vento (u e v) utilizadas nas equações de tendência de umidade e temperatura da atmosfera (T_{atmos} , q_{ar}) são campos climatológicos. Esta é uma das razões que a equação de conservação de momentum não é utilizada no modelo, sendo que, as componentes do vento são obtidas através da climatologia da circulação atmosférica para o nível de 850 hPa e fornecida durante a integração como condição de contorno em uma frequência de 12 horas. Esta simplificação força que a massa sempre se conserve permitindo a remoção da equação de conservação de massa do modelo,

A principal variável prognostica do modelo GREB é a temperatura de superfície T_{surf} e sua tendência é calculada em função dos processos físicos (figura-2)

relacionado ao balanço de energia. Onde cada termo descrito por Dommenget (2011), corresponde a uma equação de processo que foi simplificado.

$$\gamma_{surf} \frac{dT_{surf}}{dt} = F_{solar} + F_{termal} + F_{latente} + F_{sensivel} + F_{oceano} + F_{correção} \quad (3)$$

A tendência de T_{surf} é forçada pela radiação solar incidente (F_{solar}), radiação térmica (F_{termal}), o resfriamento devido ao calor latente da evaporação da água de superfície ($F_{latente}$), trocas turbulenta de calor com a atmosfera ($F_{sensivel}$) trocas de calor com o oceano profundo (F_{oceano}) e o termo de correção de fluxo ($F_{correção}$) é um termo empírico para a correção da tendência de T_{surf} . A constante γ_{surf} é a capacidade de calor de superfície.

A condição de contorno inferior para a umidade específica é calculada em função da temperatura de superfície T_{surf} , através da equação da umidade específica de saturação q_{sat} . (James 1994)

$$q_{sat} = e^{\frac{z_{topo}}{z_{atmos}}} * 3.75 * 10^{-3} * e^{\left(17.08085 \frac{T_{surf} - 273.15}{T_{surf} - 38.975}\right)} \quad (4)$$

A umidade de saturação considera o impacto da mudança de pressão de superfície devido à topografia z_{topo} .

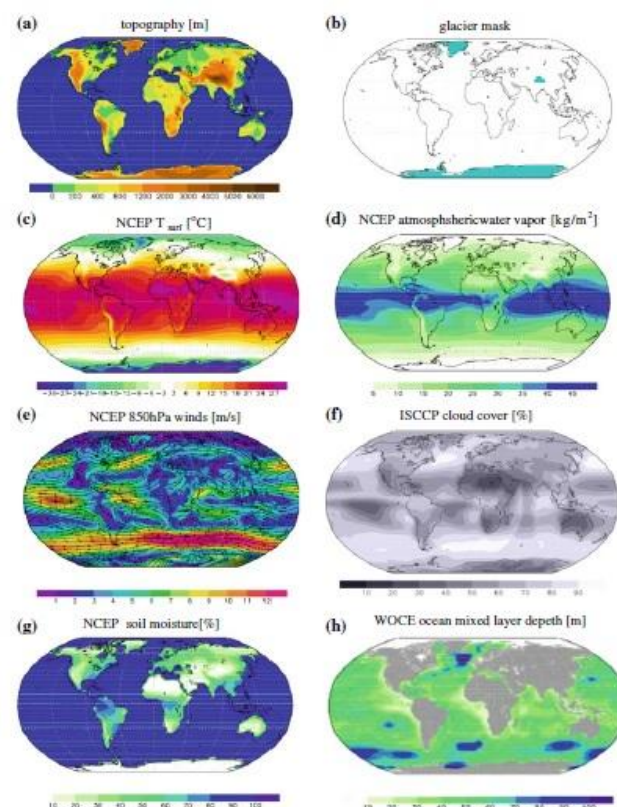
Na literatura, o modelo GREB é utilizado com uma grade horizontal (2.8 graus) similar ao Modelo Climático de Circulação Geral (CGCM), porém é de fácil uso, por exigir pouco recurso computacional para integrações longas (em um computador pessoal com uma configuração media pode-se integrar aproximadamente 200 anos em menos de 4 horas), isto é possível devido à formulação das equações governantes e das parametrizações físicas utilizadas serem bem simplificadas. O desenvolvimento do código do modelo GREB é escrito todo em linguagem FORTRAN de fácil compreensão facilitando a implementação de diferentes parametrizações físicas.

O modelo GREB utiliza como condições iniciais e de contorno dados climatológicos, estes dados possuem uma frequência de 12 horas e fornecem o padrão dinâmico e

termodinâmico do modelo. Em outras palavras, se não tivesse as parametrizações físicas, os dados das simulações longas tendem a climatologia das condições iniciais e de contorno.

As condições de contorno usada no modelo são: (a) Topografia, (b) Mascara de geleira, (c) Temperatura da superfície, (d) vapor de água na atmosfera, (e) vento a 850 hPa, (f) cobertura de nuvens, (g) umidade do solo, (h) camada de mistura oceânica, estão ilustradas na figura 1.

Figura 1 - Condições de contorno do GREB



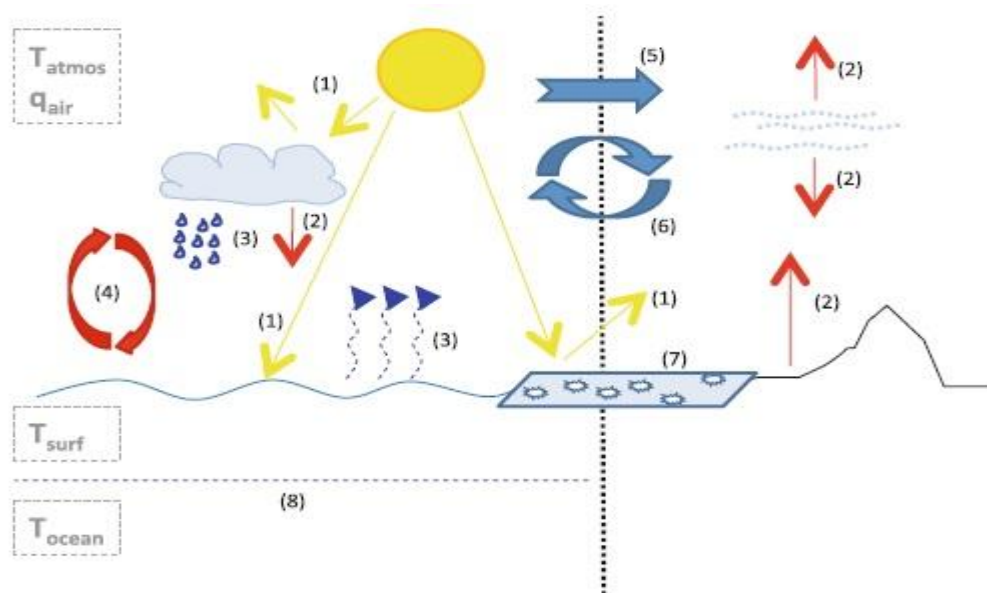
Fonte: Dommenget (2011)

Os processos físicos considerados no modelo são descritos detalhadamente em Dommenget (2011) e ilustrados na figura 2: (1) Radiação solar, (2) Radiação térmica, (3) Ciclo hidrológico, (4) Calor sensível, (5) Advecção, (6) Difusão, (7) Gelo Marítimo e (8) profundidade oceânica.

O ciclo hidrológico controla a evaporação, precipitação, arrefecimento latente na superfície e o aquecimento na atmosfera e a quantidade de vapor de água na atmosfera. A chuva é simulada se vapor de água na atmosfera se condensar e as

gotículas de água ficar grande o suficiente até cair sobre o solo. Portanto, o ar deve saturar de vapor de água, tipicamente quando o ar for levado a altos níveis (movimento vertical), adiabaticamente (reduzindo a pressão), e resfriando-se. Na atmosfera real, muitos processos físicos são envolvidos na formação da precipitação e são controlados pelas flutuações de tempo. Flutuações climáticas não podem ser simuladas pelo modelo simples GREB.

Figura 2 - Processos físicos do GREB



Fonte: Dommenget (2011)

Radiação Solar no modelo GREB é lida de um arquivo climatológico, a radiação solar é fornecida para cada dia do ano em cada latitude e a interação com a atmosfera e a superfície é parametrizada através da porcentagem da reflexão da radiação solar incidente pelo albedo. Neste esquema, a reflexão devido ao albedo está dividida em duas partes: uma parte é a reflexão na atmosfera através do albedo atmosférico “nuvens”, e a radiação de refletida pela superfície devido ao albedo de superfície “tipo de cobertura de superfície”.

Radiação Térmica da atmosfera é a forma como o CO₂ ou outros gases do efeito de estufa podem influenciar o clima global. Para compreender a parametrização de radiação de onda longa é necessário ter uma visão geral sobre um modelo de equilíbrio da radiação térmica na atmosfera, Onde os principais aspectos são:

- A radiação térmica emitida a partir de cada camada da atmosfera é uma função da emissividade, e temperatura, em cada camada.
- A radiação térmica absorvida a partir de cada camada é uma função da emissividade da camada e de todas as outras emissividades e temperatura das camadas atmosféricas.
- A emissividade, em cada camada é uma função da pressão, composição química (H₂O, CO₂) e densidade das nuvens.

4.2 Função de emissividade GREB

A parametrização da emissividade da atmosfera utilizada no modelo de onda longa implementado originalmente no modelo GREB é representada pela equação abaixo:

$$\epsilon_{atmos} = F(CO_2, H_2O_{vapor}, Cobertura\ de\ nuvens) \quad (5)$$

Observa-se na equação que a emissividade possui 3 bandas espectrais (para simular a sobreposição das bandas de absorção de H₂O e CO₂), não representando de forma explícita os outros gases do efeito estufa. A equação da emissividade da atmosfera é dividida em duas, a primeira para céu claro e a segunda para céu com a presença de nuvens.

Para condição de céu claro a emissividade é parametrizada pela equação (KIEHL; RAMANATHAN, 1982)

$$\epsilon_{clear-sky} = P_4 \log[p_1 * CO_2^{topo} + P_2 * H_2O_{vapor} + P_3] + P_5 \log[P_1 * CO_2^{topo} + P_3] + P_6 \log[P_2 * H_2O_{vapor} + P_3] + P_7 \quad (6)$$

$P_4 \log[p_1 * CO_2^{topo} + P_2 * H_2O_{vapor} + P_3]$ termo de absorção devido a CO₂ e H₂O

$P_5 \log[P_1 * CO_2^{topo} + P_3]$ termo de absorção devido somente a CO₂

$P_6 \log[P_2 * H_2O_{vapor} + P_3]$ termo de absorção devido somente a H₂O

Onde: $\epsilon_{clear-sky}$ é a emissividade considerando céu claro, CO_2^{topo} é a concentração de CO₂ na atmosfera escalado por mudanças na pressão de superfície devido à

altura topográfica, P_{1-3} são escalas de concentrações de gases de efeito estufa, assume-se ser a mesma para cada banda de absorção. P_{4-6} é a importância relativa de cada banda espectral de absorção, P_7 é uma constante de ajuste artificial.

A parametrização que faz a sobreposição da contribuição da emissividade devido ao céu claro e o céu com coberto de nuvens é representada pela equação proposta por Domménget (2011):

$$\epsilon_{atmos} = \frac{P_8 - cld}{P_9} * (\epsilon_{clear-sky} - P_{10}) + P_{10} \quad (7)$$

Onde: ϵ_{atmos} é a emissividade efetiva, P_{8-10} são parâmetros de escala de nuvens, cld é a cobertura de nuvens, na presença de nuvens a emissividade é maior e os efeitos da concentração dos gases do efeito estufa são reduzidos.

4.3 Implementação das equações da nova parametrização da emissividade da atmosfera em função da concentração dos gases do efeito estufa

O modelo GREB conta apenas com a presença de Vapor de Água (H₂O) e Dióxido de Carbono (CO₂) como gases do efeito estufa, sendo a emissividade parametrizada somente com 3 bandas espectrais (para simular a sobreposição das bandas de absorção de H₂O e CO₂). Como o objetivo deste trabalho é analisar a contribuição dos principais gases do efeito estufa no aquecimento global foi necessário implementar uma nova parametrização da emissividade da atmosfera para céu claro. Portanto, elaborou-se uma parametrização que considera os quatro principais gases do efeito estufa (CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12) com o intuito de verificar o aumento da temperatura global em função do aumento destes gases é coerente com estudos publicados.

A nova parametrização da emissividade para o céu claro foi baseada na própria parametrização do modelo GREB. Somente foram separadas as contribuições de cada gás sobre a emissividade da atmosfera, para o caso do vapor de água H₂O foi utilizado o mesmo termo da equação original. Entretanto para os demais gases a contribuição na emissividade da atmosfera foi obtida através das equações das forçantes radiativas descrita em Myhre et al. (1998). As equações simplificadas de parametrização da emissividade da atmosfera devidas aos gases do efeito estufa

(CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12) em função das suas concentrações utilizadas na nova parametrização e implementadas no modelo GREB são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Equação simplificada

Gases do efeito estufa	Equação simplificada da forçante radiativa, ΔF , Wm ⁻²	Constante α IPCC
CO ₂	$\Delta F_{CO_2} = \alpha \ln(C/C_0)$	6,3
CH ₄	$\Delta F_{CH_4} = \alpha (\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) - (f(M, N_0) - f(M_0, N_0))$	0,036
N ₂ O	$\Delta F_{N_2O} = \alpha (\sqrt{N} - \sqrt{N_0}) - (f(M_0, N) - f(M_0, N_0))$	0,14
CFC 11	$\Delta F_{CFC_{11}} = \alpha (X - X_0)$	0,22
CFC 12	$\Delta F_{CFC_{12}} = \alpha (X - X_0)$	0,28
$f(M, N) = 0,47 \ln[1 + 2,01 \times 10^{-5} (MN)^{0,75} + 5,31 \times 10^{-15} M(MN)^{1,52}]$		

Fonte: Myhre et al. (1998)

Onde:

C é CO₂ em ppmv

M é CH₄ em ppbv

N é N₂O em ppbv

X é CFC em ppbv

O subscrito 0 indica que a concentração é imperturbável.

A nova parametrização da emissividade da para céu claro proposta neste trabalho é representada pela equação abaixo, que parametrizada a emissividade em função das forçantes radiativas correspondentes a concentração dos gases do efeito estufa.

$$\epsilon_{clear-sky} = P_6 \log[P_2 * H_2O_{vapor} + P_3] + \frac{DF_{CO_2}}{\sigma T_{ar}^4} + \frac{DF_{CH_4}}{\sigma T_{ar}^4} + \frac{DF_{N_2O}}{\sigma T_{ar}^4} + \frac{DF_{CFC_{11}}}{\sigma T_{ar}^4} + \frac{DF_{CFC_{12}}}{\sigma T_{ar}^4} + P_{emi_a} \quad (8)$$

E a sobreposição com a emissividade devida ao céu coberto de nuvens é dada pela equação:

$$\epsilon_{atmos} = \frac{P_8 - cld}{P_9} * (\epsilon_{clear-sky} - P_{10}) + P_{10} \quad (9)$$

4.4 Descrições dos experimentos

Todos os experimentos apresentados na tabela 2 foram integrados com uma grade regular (lat-lon) horizontal de 2,8 graus por um período de 100 anos. O tempo de simulação foi determinado levando em consideração o tempo que o modelo demora em se ajustar as novas forçantes radiativas que é de aproximadamente 30 anos.

1° passo: foi executado um experimento controle onde foram mantidas as concentrações atuais dos gases.

2° passo: foram executadas duas baterias de cinco experimentos aumentando em dois e quatro vezes a concentração dos gases.

3° passo: foram descartados os primeiro 30 anos da simulação que é considerado o tempo em média para ajuste do modelo.

4° passo: a diferença de temperatura entre os experimentos aumentando a concentração dos gases com a temperatura do experimento controle foi realizada considerando os 30 últimos anos da simulação.

A Tabela 2 mostra o resumo dos experimentos executados.

Tabela 2 - Resumo dos Experimentos

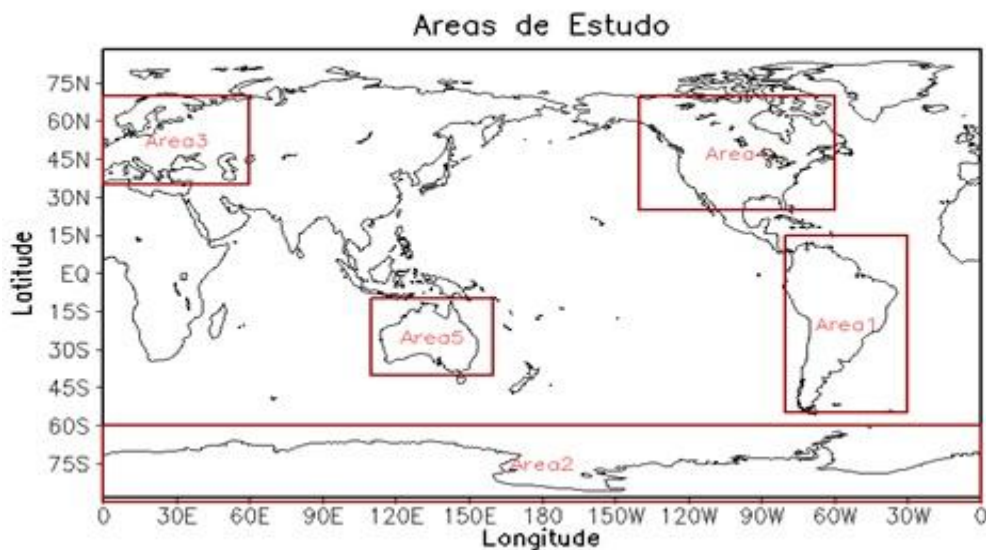
Experimentos	Descrição das concentrações (ppmv)				
	Co2 (ppmv)	CH4 (ppbv)	N2O (ppbv)	CFC11 (ppbv)	CFC12 (ppbv)
Controle	270	700	280	0.3520	0.6352
Exp-1	2X [4X]	=	=	=	=
Exp-2	=	2X [4X]	=	=	=
Exp-3	=	=	2X [4X]	=	=
Exp-4	=	=	=	2X [4X]	=
Exp-5	=	=	=	=	2X [4X]

Fonte: Autor (2015)

4.5 Métodos de análise dos resultados

Para a análise dos resultados foram definidas algumas áreas específicas distribuídas ao redor do globo que são apresentadas na Figura 3. Para estas áreas foram obtidas temperaturas média na área para os últimos 30 anos de integração dos experimentos em função da resposta das forçantes radiativas geradas pelo aumento das concentrações dos gases do efeito estufa nas simulações.

Figura 3 - Áreas do globo onde foram obtidas simulação de temperatura média: Áreas: (1) América do Sul, (2) Antártida, (3) Europa, (4) América do Norte, (5) Oceania e (g) Globo.

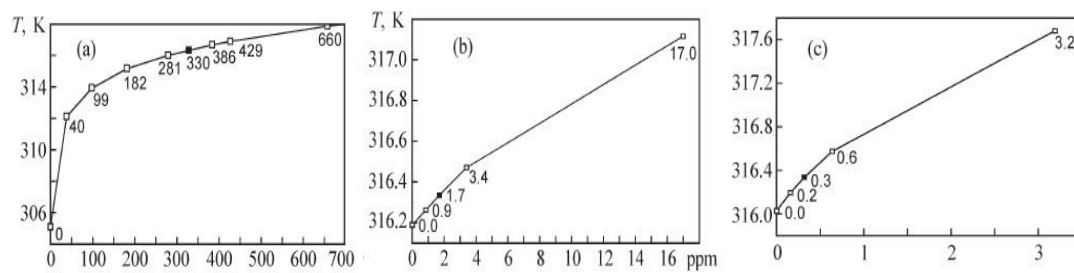


Fonte: Autor (2015)

Nas análises dos resultados, as temperaturas obtidas nas simulações serão comparadas com os valores das temperaturas medias globais publicadas na literatura, obtidas através de simulações com modelos globais complexos e de vários cenários para um provável futuro do planeta. A validação das simulações com o aumento da concentração dos gases do efeito estufa será baseada principalmente nos valores descritos nos trabalhos de Semenov (2011) e nos relatórios do IPCC.

Na figura 4, estão os valores do aumento de temperatura em função do aumento gradual da concentração dos principais gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O) (SEMENOV, 2011). Neste trabalho espera-se obter os mesmos comportamentos do aumento de temperatura em função da concentração dos gases do efeito estufa. Desta forma, validara a nova implementação de emissividade introduzida no modelo GREB.

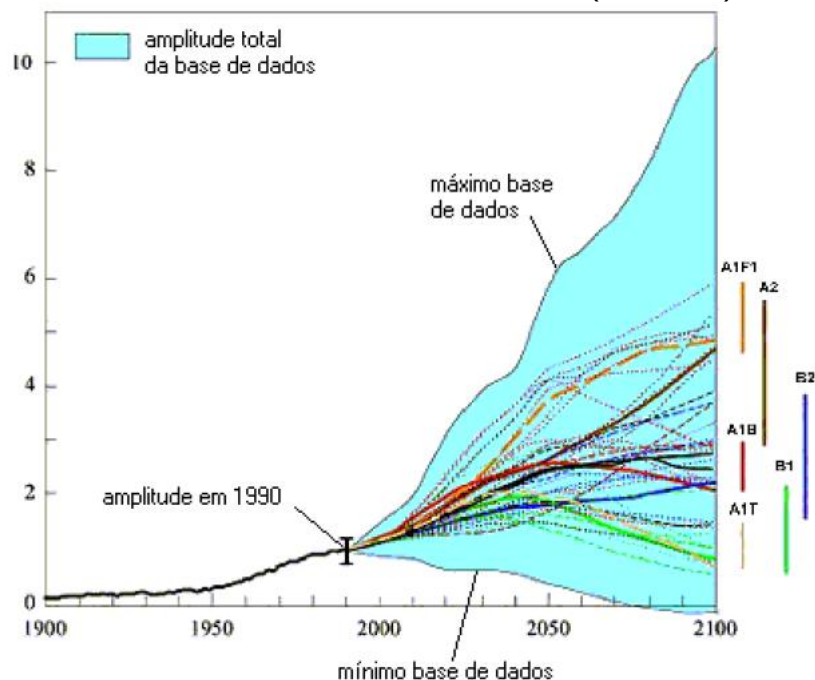
Figura 4 - Temperatura média global obtida através de simulação aumentando a concentração dos gases (a) CO₂, (b) CH₄ e (c) N₂O



. Fonte: Semenov (2011)

De acordo com o quarto relatório do IPCC de 2007 existem seis grupos de cenários igualmente plausíveis, que enquadra um campo grande de incertezas. Estes incluem quatro combinações de mudança demográfica, desenvolvimento social e econômico, e amplo desenvolvimento tecnológico, correspondendo às quatro famílias (A1, A2, B1, B2). Sobre estes cenários há as emissões de dióxido de carbono relacionado às características de cada família. Na figura 5, estão ilustradas as emissões globais de CO₂ até 1990 e a partir deste ano até 2100 as emissões são representadas por cenários, tendo como base a emissão do ano de 1990 (normalizada com o valor absoluto da emissão de 1990).

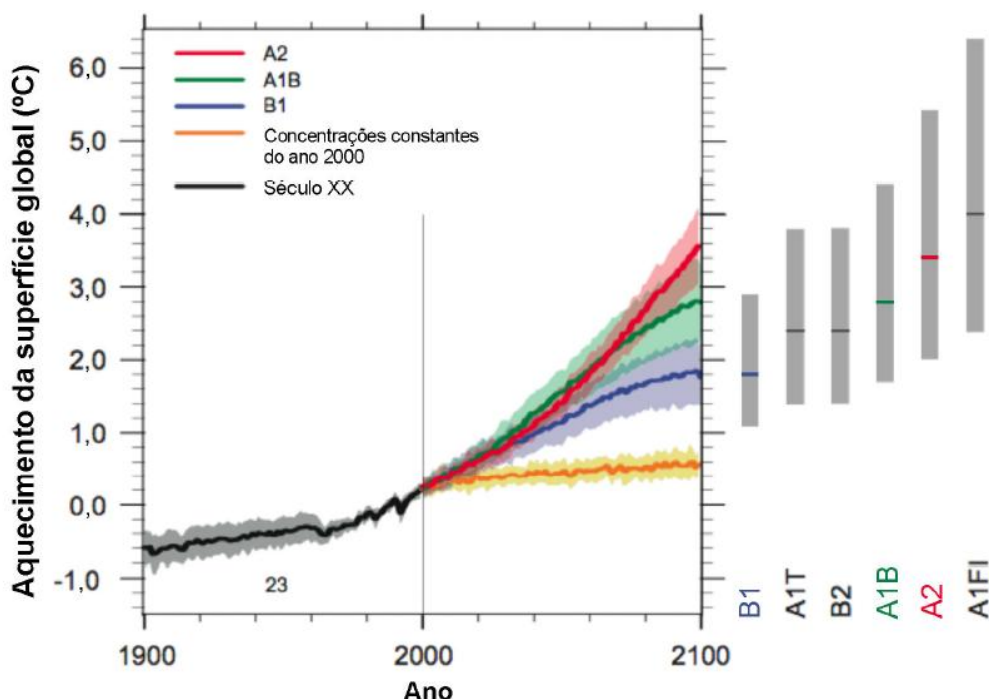
Figura 5 - Emissões Globais de Dióxido de Carbono CO₂ relacionadas do setor de energia e indústria. Cenários e Base de Dados SRES (1990 = 1).



Fonte: Adaptado, IPCC (2007)

Neste trabalho, um dos resultados obtidos são as séries temporais mensais de campos de temperatura global. Portanto, pode-se utilizar como base para análise os resultados apresentados pelo quarto relatório do IPCC, 2007 e comparar com os resultados obtidos nas simulações do presente trabalho. Na figura 6 estão ilustrados os aumentos de temperatura para alguns cenários do IPCC, onde estes aumentos estão relacionados ao aumento das emissões de CO₂ para a atmosfera (figura 5).

Figura 6 - As linhas sólidas são médias globais do aquecimento da superfície produzidas por vários modelos (relativas a 1980-99) para os cenários A2, A1B e B1, mostradas como continuações das simulações do século XX. O sombreamento denota a faixa de mais/menos um desvio-padrão para as médias anuais individuais dos modelos. A linha alaranjada representa o experimento em que as concentrações foram mantidas constantes nos valores do ano 2000. As colunas cinza à direita indicam a melhor estimativa (linha sólida dentro de cada coluna) e a faixa provável avaliada para os seis cenários marcadores do RECE. A avaliação da melhor estimativa e das faixas prováveis nas colunas cinza compreende os AOGCMs na parte esquerda da figura.

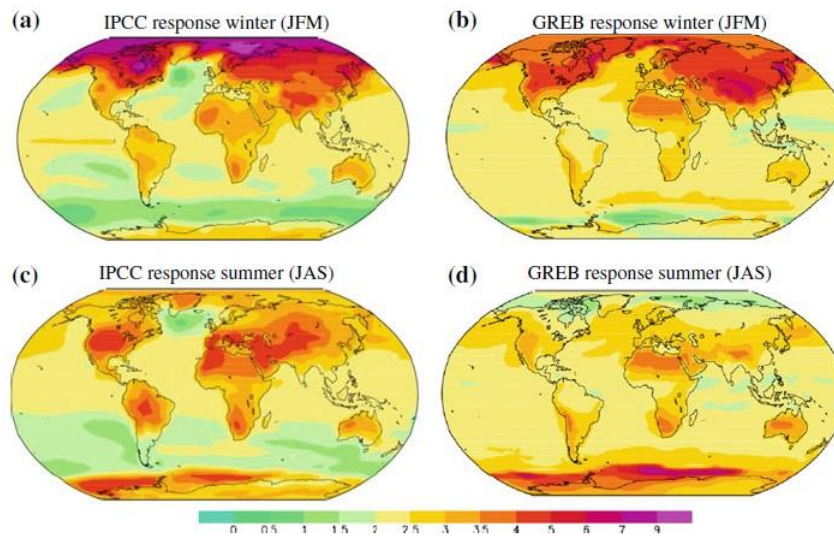


Fonte: Adaptado, IPCC (2007)

Sobre a distribuição espacial de temperatura os resultados obtidos com a nova parametrização de emissividade serão comparados com os resultados obtidos por Dommengot (2011) e da resposta ao cenário de forçante de CO₂ (IPCC A1B), apresentados na figura 7.

As análises serão feitas somente de forma qualitativa comparando os padrões de aquecimento ao redor do planeta.

Figura 7 - Padrão global de temperatura, à esquerda (a) IPCC verão e (c) IPCC inverno, à direita (b) Greb verão e (d) Greb inverno.



Fonte: Dommenges (2011)

5 RESULTADOS

A partir das simulações realizadas neste trabalho pretende-se observar o comportamento da tendência do aquecimento global em função do aumento da concentração dos gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12). As análises que serão realizadas nos tópicos abaixo visam validar a nova parametrização de emissividade da atmosfera proposto neste trabalho e comprovar o aquecimento global devido às forçantes radiativas geradas a partir dos gases do efeito estufa em simulações longa (100 anos).

5.1 Análises das médias globais e regionais do aumento da temperatura em simulações longas de 100 anos

Do conjunto de experimentos (11 membros, tabela 2) realizados com diferentes concentrações dos gases do efeito estufa, dois membros são referentes ao aumento da concentração de CO₂. Pode-se verificar na tabela 3, que como aumento da concentração de CO₂ em 2 vezes (290 a 580 ppmv) o aumento da temperatura global (área_g) é estimada em 2,28(2,21) °C para DJF(JJA) em simulações de 100 anos. Este resultado é similar ao valor estimado por Semenov (2011) (figura 4). Nota-se o mesmo comportamento quando se compara com aumento de temperatura dos cenários A1, B1 do IPCC (2007) para um aumento de 2 vezes a concentração de CO₂ (figura 5 e 6). Nos membros referentes aos experimentos com o aumento da concentração de CO₂ em 4 vezes (290 a 1160ppmv), verifica-se que o aumento da temperatura estimado pelo modelo é entorno de 4,46(4,34) °C para o período de DJF(JJA). Estes valores são relativamente maiores em relação ao valor médio obtidos nas simulações longas para o cenário A2 do IPCC, (2007).

Sobre o aspecto regional observa-se na tabela 3a um aumento de temperatura maior para as áreas (ÁREA 2, ÁREA 5[Antártida e a Oceania]) em relação as áreas (ÁREA 1, ÁREA 3, ÁREA 4 [América do Sul ,Europa e América do Norte]). Este resultado está relacionado à concentração de vapor de água na atmosfera. A nova parametrização separa as influências dos gases do efeito estufa incluindo o vapor de água no cálculo da emissividade. Portanto, regiões onde há maior concentração de vapor de água os gases de efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12) tem

pouca influencia na emissividade. O contrário ocorre em regiões mais secas, onde os gases (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12) passam a ter maior importância.

Os membros referentes ao CH₄ para simulações longas de 100 anos apresentados na tabela 3b indicam que a temperatura média global (área_g) para a duplicação (700 a 1400 ppbv) da concentração do gás na atmosfera irá aumentar a temperatura de superfície em torno de 0,19(0,18) °C para o período DJF(JJA). No caso do aumento de 4 vezes (700 a 2800 ppbv) a temperatura média global (área_g) sofrerá um aumento de 0,46(0,45) °C para o período de DJF(JJA). Ambos os resultados para a variação do gás CH₄ na atmosfera estão de acordo com o encontrado em Semenov (2011), figura 4b.

Uma análise mais regional observa-se que o aumento de temperatura não é homogêneo. Regionalmente podemos verificar que há um aumento maior de temperatura nas áreas (ÁREA 4, ÁREA 3 [América do Norte, Europa]) em relação as demais áreas. Estas diferenças podem ser atribuídas a diferenças de concentração de vapor de água nestas regiões.

Para os experimentos de simulações longas com o Óxido Nitroso (N₂O), verificou-se que duplicando (280 a 560 ppbv) a sua concentração na atmosfera o aumento de temperatura ilustrada na tabela 3c tem valores em torno de 0,5(0,48) °C na média global (área_g) para o período DJF(JJA). No caso do aumento de 4 vezes (280 a 1120ppbv) a temperatura média global (área_g) sofre um aumento de 1,22(1,19) °C para o período de DJF(JJA). Esses resultados demonstram estar de acordo aos com os valores apresentados no trabalho de Semenov (2011) figura 4c.

Sobre o aspecto regional, as áreas (ÁREA 2, ÁREA 4 [Antártida, América do Norte]) sofreram um aumento maior de temperatura em relação as demais áreas quando se trata do aspecto regional. Este resultado também pode ser explicado pela baixa concentração de vapor de água nestas regiões e a fina espessura da atmosfera devido à topografia, onde prevalecem os gases de efeito estufas utilizados na parametrização do modelo de forma homogênea em toda a atmosfera.

Com relação aos membros relacionados ao experimento com CFCs, os aumentos da concentração destes gases proporcionam um aumento da temperatura média global em torno de 0,04(0,04) °C para o período de DJF(JJA) duplicando a concentração

de CFC 11 e 0,13(0,12) °C para o período de DJF(JJA) quadruplicando a concentração do CFC 11. A duplicação de CFC 12 causará um aumento de 0,10(0,09) para o período de DJF(JJA) e um aumento de 0,29(0,29) °C para o período de DJF(JJA) se quadruplicar a concentração do CFC 12. Este padrão de aumento da temperatura global e regional segue os mesmos princípios dos outros gases (redução da concentração de vapor de água e espessura da atmosfera).

Tabela 3 - Temperaturas média por área devido o aumento de 2 e 4 vezes dos gases do efeito estufa. (a) CO₂, (b) CH₄, (c) N₂O, (d) CFC 11 e (e) CFC 12.

CO ₂	DJF (2X)	DJF (4X)	JJA (2X)	JJA (4X)
ÁREA 1	1,95	3,82	2,03	3,97
ÁREA 2	1,51	3,43	4,09	8,86
ÁREA 3	2,90	5,38	2,17	4,21
ÁREA 4	3,15	6,00	2,10	3,99
ÁREA 5	2,22	4,36	2,34	4,58
ÁREA G	2,28	4,46	2,21	4,34

(a)

CH ₄	DJF (2X)	DJF (4X)	JJA (2X)	JJA (4X)
ÁREA 1	0,16	0,39	0,17	0,4
ÁREA 2	0,12	0,31	0,3	0,78
ÁREA 3	0,25	0,61	0,18	0,44
ÁREA 4	0,26	0,63	0,18	0,44
ÁREA 5	0,18	0,44	0,19	0,46
ÁREA G	0,19	0,46	0,18	0,45

(b)

N ₂ O	DJF (2X)	DJF (4X)	JJA (2X)	JJA (4X)
ÁREA 1	0,42	1,03	0,44	1,07
ÁREA 2	0,31	0,85	0,79	2,24
ÁREA 3	0,66	1,61	0,48	1,16
ÁREA 4	0,69	1,69	0,48	1,15
ÁREA 5	0,48	1,17	0,50	1,23
ÁREA G	0,50	1,22	0,48	1,19

(c)

CFC11	DJF (2X)	DJF (4X)	JJA (2X)	JJA (4X)
ÁREA 1	0,04	0,11	0,04	0,11
ÁREA 2	0,03	0,09	0,07	0,21
ÁREA 3	0,06	0,17	0,04	0,12
ÁREA 4	0,06	0,18	0,04	0,12
ÁREA 5	0,04	0,12	0,04	0,13
ÁREA G	0,04	0,13	0,04	0,12

(d)

CFC12	DJF (2X)	DJF (4X)	JJA (2X)	JJA (4X)
ÁREA 1	0,08	0,25	0,09	0,26
ÁREA 2	0,06	0,19	0,15	0,49
ÁREA 3	0,13	0,39	0,09	0,28
ÁREA 4	0,13	0,41	0,09	0,28
ÁREA 5	0,09	0,28	0,10	0,30
ÁREA G	0,10	0,29	0,09	0,29

(e)

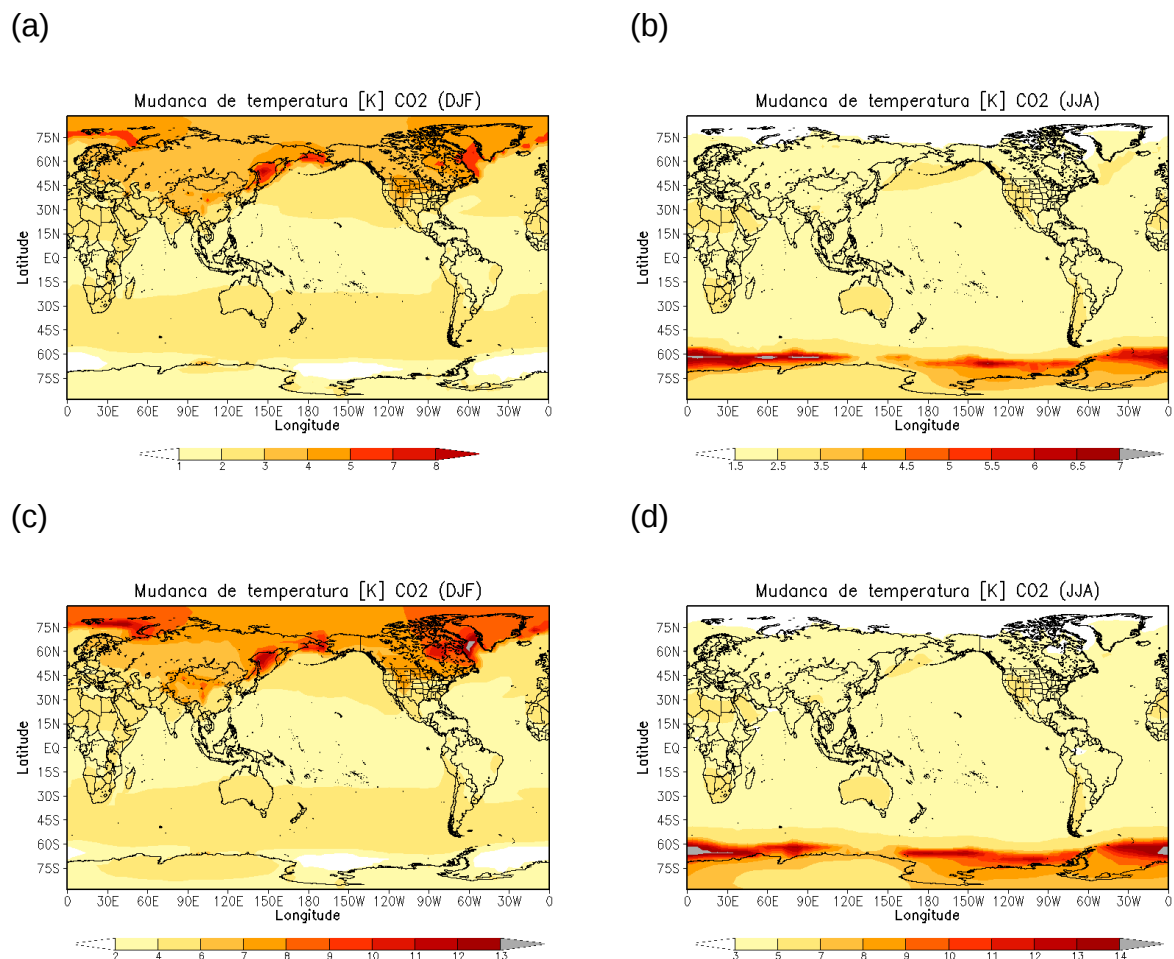
Fonte: Autor (2015)

5.2 Análises do padrão global do aumento da temperatura

Com relação às análises dos padrões globais do aumento da temperatura com a nova parametrização proposta neste trabalho, que permite controlar a emissividade da atmosfera com o aumento da concentração de cada um dos gases do efeito estufa (CO₂, CH₄, N₂O, CFC11 e CFC12) independentemente. Os membros dos experimentos aumentando em 2 vezes a concentração do Dióxido de Carbono (CO₂) tem os resultados similares aos apresentados em Dommengot (2011) (Figura 7). Onde, para o verão (DJF) nas áreas selecionadas para o estudo os valores de

aumento de temperatura coincidiram, como por exemplo: (ÁREA 1, [América do Sul]) em ambas as simulações a temperatura aumentou em torno de 2°C, (ÁREA 4, [América do Norte/Estados Unidos]) em torno de 4,5°C, (ÁREA 5, [Oceania/Austrália]) em torno de 3°C e na (ÁREA 3, [Europa]) em torno de 3,5°C. No inverno (JJA) o aumento das temperaturas na (ÁREA 2, [Antártida]) variam de 3,5 a 7°C. Assim validando a nova parametrização do modelo para uso de previsão climática (Figura 8a e b).

Figura 8 - Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB utilizando a parametrização proposta no trabalho e aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CO₂: (a) 2x CO₂ Verão, (b) 2x CO₂ Inverno, (c) 4x CO₂ Verão e (d) 4x CO₂ Inverno.



Fonte: Autor (2015)

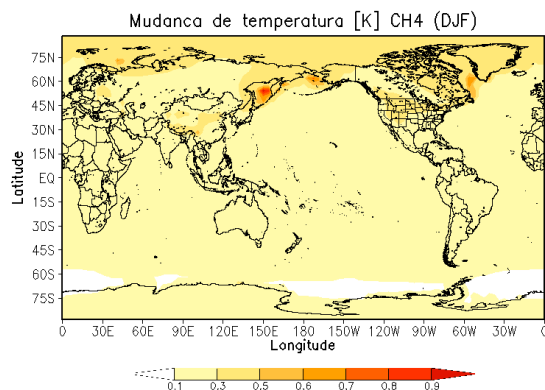
Na Figura 8c e d, é apresentado o padrão de temperatura global para o aumento de 4 vezes a concentração de CO₂. No verão (DJF), a (ÁREA 1, [América do Sul]) sofreu um aumento de temperatura variando de 3 a 5°C, na (ÁREA 4, [América do Norte]) o aumento será de 6 a 8°C, a (ÁREA 5, [Oceania]) ficará em torno de 5 a 6°C

mais quente e a (ÁREA 3, [Europa]) em torno de 7°C de elevação na temperatura. Isso é preocupante tendo em vista que essas áreas contam com uma grande densidade populacional.

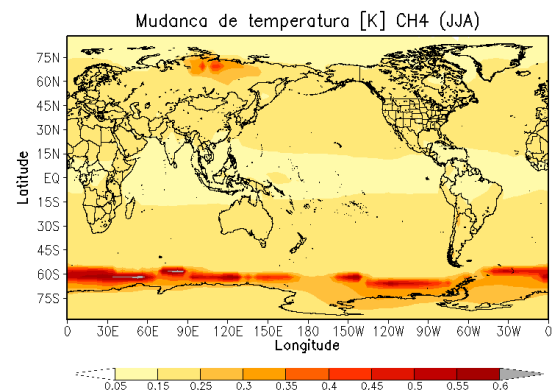
Um aspecto importante observado nas simulações com os experimentos com o aumento da concentração de CO₂ é o impacto no aumento de temperatura nos hemisférios, que depende da radiação solar incidente. Nos solstício de inverno nos dois hemisférios o aumento de temperatura é sempre maior que nos solstício de verão nos dois hemisférios.

Figura 9 - Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB utilizando a parametrização proposta no trabalho e aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CH₄: (a) 2x CH₄ Verão, (b) 2x CH₄ Inverno, (c) 4x CH₄ Verão e (d) 4x CH₄ Inverno.

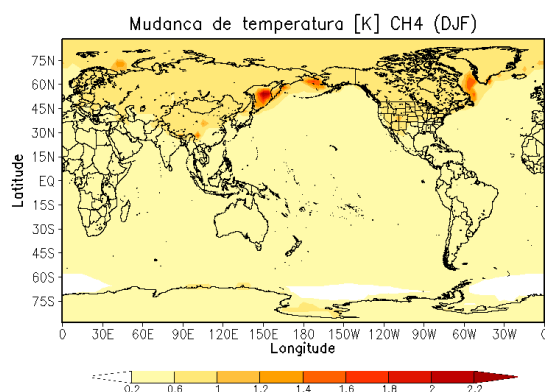
(a)



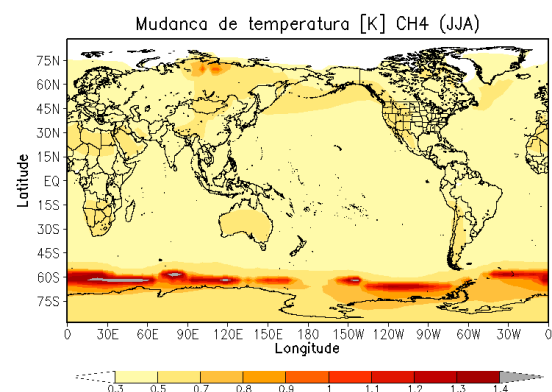
(b)



(c)



(d)



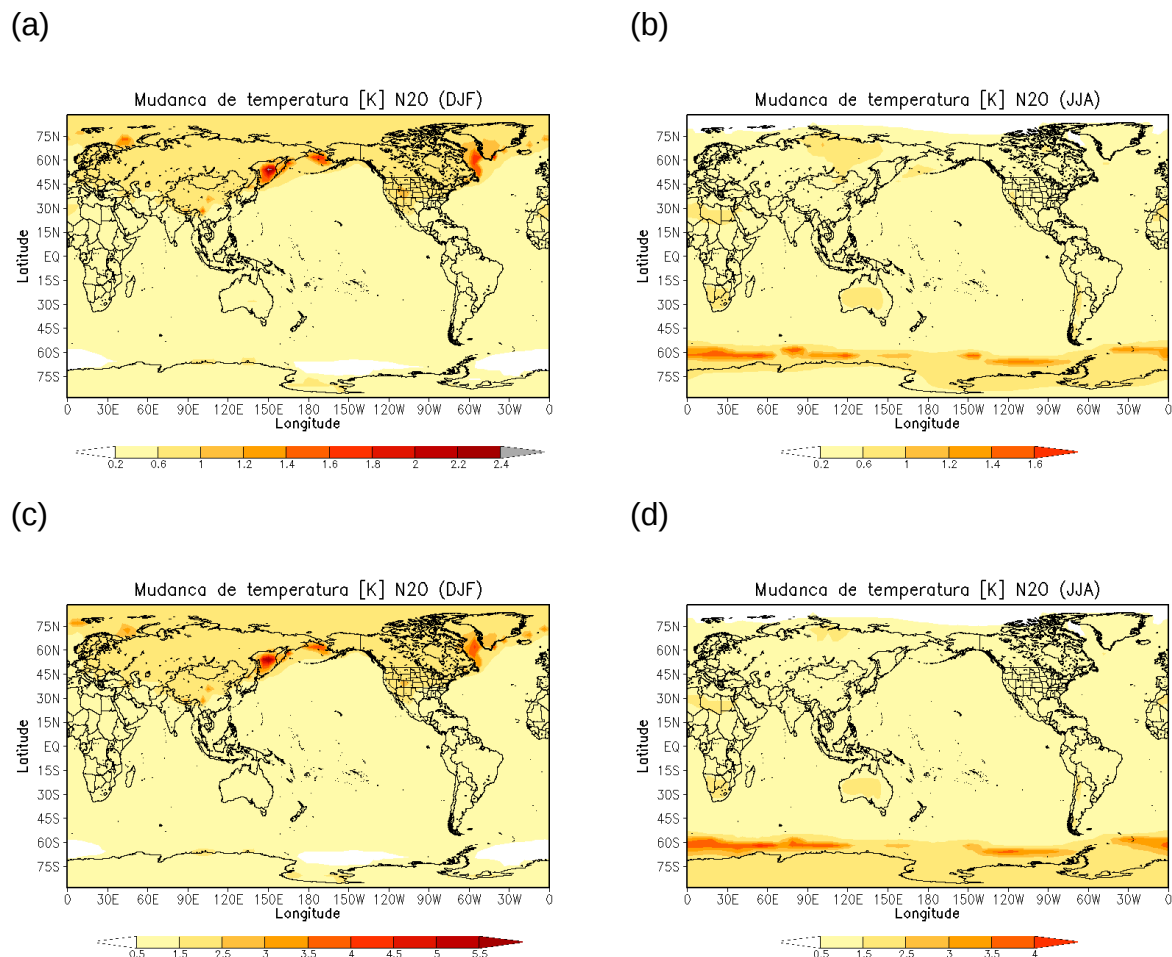
Fonte: Autor (2015)

Para o metano (CH₄) a resposta no aumento da temperatura nas áreas selecionadas não passa de 1°C, quando se duplica a sua concentração na atmosfera. Para o aumento de 4 vezes na concentração de CH₄ na atmosfera a

temperatura aumentará em torno de 1°C nas áreas selecionadas com destaque de 1,2°C na (ÁREA 4, [América do Norte/Estados Unidos]) no verão (DJF) e 1.4°C na (ÁREA 2, [Antártida]) no inverno (JJA) (Figura 9).

O Oxido Nitroso (N₂O) é um gás do efeito estufa que em grandes concentrações causa uma elevação significativa na temperatura global, até mais acentuada que o Metano (CH₄), Figura 10.

Figura 10 - Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB utilizando a parametrização proposta no trabalho e aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de N₂O: (a) 2x N₂O Verão, (b) 2x N₂O Inverno, (c) 4x N₂O Verão e (d) 4x N₂O Inverno.



Fonte: Autor (2015)

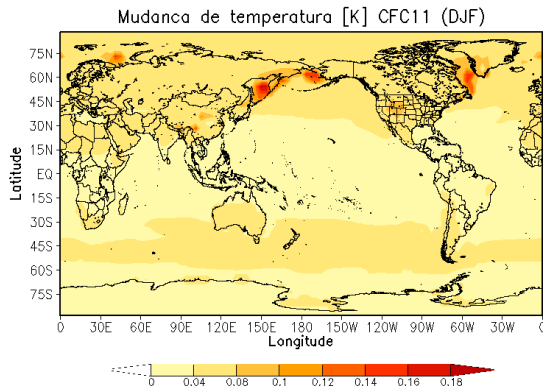
Na avaliação referente à resposta da temperatura em função da duplicação da concentração do gás (N₂O) na atmosfera, observamos que no verão (DJF) os maiores aumentos de temperaturas entre as áreas de estudo, as quais se podem destacar são: (ÁREA 4, ÁREA 3 [América do Norte, Europa]) com valores de aproximadamente 1,2 °C, as áreas (ÁREA 1, ÁREA 2, ÁREA5 [América do Sul,

Antártida e Oceania]) não apresentam um aumento muito marcante na temperatura destacando a Austrália (0,6 °C) e o Brasil (0,6 °C). No inverno (JJA) as maiores elevações de temperaturas aparecem na (ÁREA 2 [Antártida]) variando entre 0,1 a 1,6 °C e nas demais áreas (ÁREA 1, ÁREA 3,ÁREA 4, ÁREA 5 [América do Sul , Europa, América do Norte e Oceania]) as temperaturas aumentam em torno de 0,6 °C. Analisando membro dos experimentos com a concentração 4 vezes maior de N₂O na atmosfera verifica-se que no verão (DJF) as temperaturas alcancem em torno de 3°C nas áreas (ÁREA 4, ÁREA 3 [América do Norte, Europa]). Na (ÁREA 2 [Antártida]) as temperaturas aumentaram em torno de 4°C no inverno (JJA).

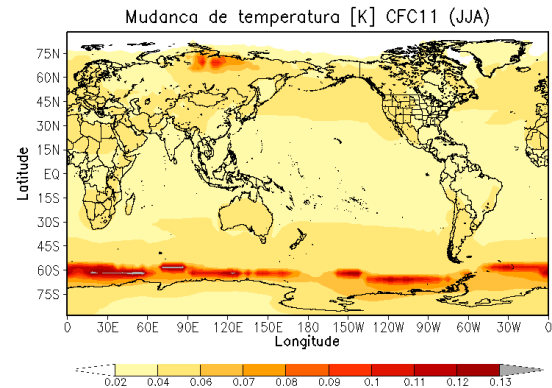
As análises dos membros referentes ao aumento das concentrações de CFC's 11 e 12 (Figura 11 e 12) na atmosfera indicam que estes gases têm pouco impacto direto no aumento da temperatura global, ou seja, não causará uma elevação acentuada na temperatura global, porém, podem ter outros impactos na atmosfera do planeta.

Figura 11 - Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB utilizando a parametrização proposta no trabalho e aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CFC11: (a) 2x CFC11 Verão, (b) 2x CFC11 Inverno, (c) 4x CFC11 Verão e (d) 4x CFC11 Inverno.

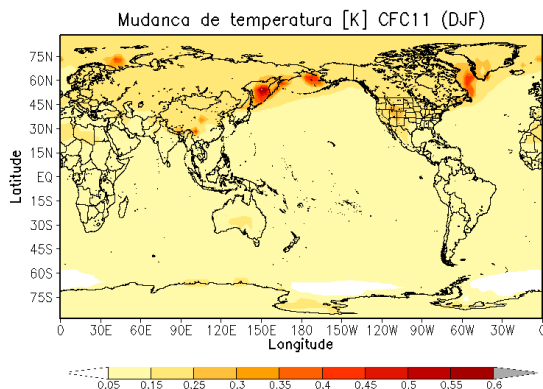
(a)



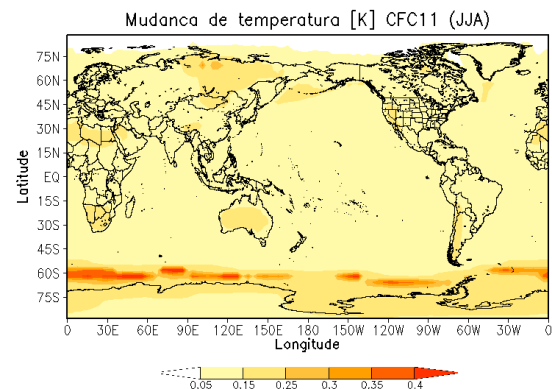
(b)



(c)



(d)

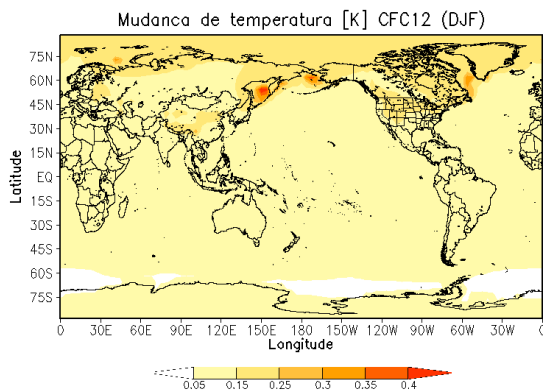


Fonte: Autor (2015)

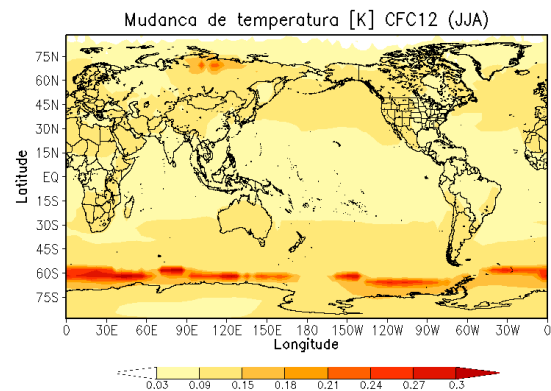
A figura 11a, b, c e d mostram o aumento de temperatura em função de diferentes concentrações do gás CFC 11 na atmosfera, para as regiões de maior aumento de temperatura os valores não ultrapassam $0,1^{\circ}\text{C}$ para a concentração do gás CFC 11 duplicada e no período de verão (DJF) nas áreas de estudo. Para o inverno (JJA), pode-se destacar a (ÁREA 2 [Antártida]) com temperaturas que podem ficar $0,13^{\circ}\text{C}$ mais elevadas. Com o gás CFC 11 quadruplicado no verão (DJF) destacamos a (ÁREA 4 [América do Norte] mais precisamente os Estados Unidos da América) que apresentam temperaturas de $0,35^{\circ}\text{C}$ mais elevadas e no inverno (JJA) os valores de aumento de temperaturas esperadas para a (ÁREA 2 [Antártida]) variam entre $0,35$ a $0,4^{\circ}\text{C}$.

Figura 12 - Simulação do padrão de temperatura obtida com o modelo GREB utilizando a parametrização proposta no trabalho e aumentando em 2 e 4 vezes a concentração de CFC12: (a) 2x CFC12 Verão, (b) 2x CFC12 Inverno, (c) 4x CFC12 Verão e (d) 4x CFC12 Inverno.

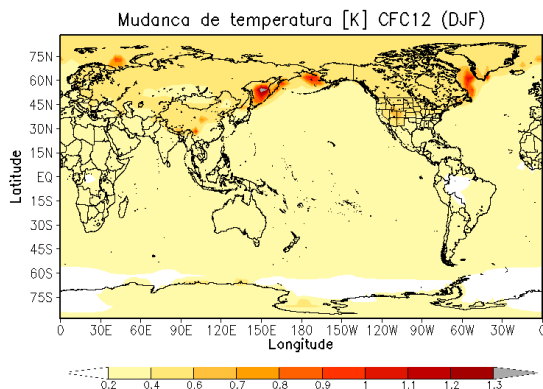
(a)



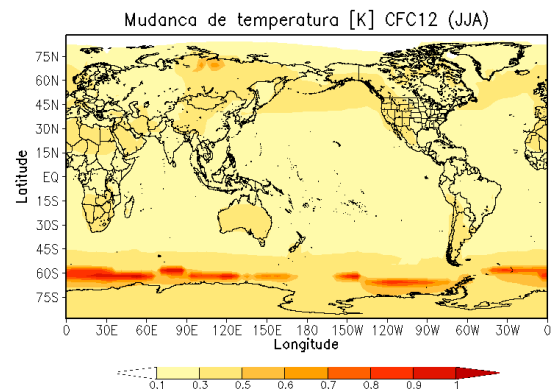
(b)



(c)



(d)



Fonte: Autor (2015)

Com relação ao gás CFC 12 apresentado na figura 12a, b, c e d quando tem sua concentração duplicada na atmosfera implica em um aquecimento não muito elevado, destacando a (ÁREA 4 [América do Norte] mais precisamente os Estados Unidos da América) no verão (DJF) com um aumento de 0,25°C e (ÁREA 2 [Antártida]) no inverno (JJA) com aumento de temperaturas variando de 0,18 a 0,3°C. Já com uma concentração 4x maior de CFC 12 na atmosfera a temperatura pode atingir valores de 0,7°C mais elevadas nas (ÁREA 4, ÁREA 3 [América do Norte, Europa]) no verão (DJF) e valores em torno de 1°C na (ÁREA 2 [Antártida]) no inverno (JJA).

Em todas as análises a Amazônia sofre aumento de temperatura, porém, aparece mais acentuada quando se quadruplica a concentração de CO₂ na atmosfera, a

temperatura aumenta em torno de 5 °C. Segundo um estudo feito por NOBRE e ASSAD (2005) baseado em simulações realizadas a partir de 6 modelos climáticos globais utilizados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), com o aumento de 2 a 3 °C na temperatura média espera-se que até 40% das árvores desapareçam até final do século, algo preocupante pelo fato de que a combinação dos efeitos causados pelas aumento da temperatura média global somados a mudança de uso da terra irão causar mudanças no ciclo hidrológico e conseqüentemente mudanças no clima regional e até global.

6 CONCLUSÃO

Com a implementação da nova parametrização da emissividade da atmosfera levando em conta a forçante radiativa devido à presença dos gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O e hidrocarbonetos halogenados) observamos que variando suas concentrações na atmosfera a temperatura sofre um aumento médio global. Para o CO_2 , por exemplo, ele causa um aumento de temperatura na média global relevante em comparação aos outros gases, com valores que variam de 2,28 a 4,46 °C dependendo da concentração do gás e da estação do ano. O CH_4 causou o aumento de temperatura média global variando entre 0,19 e 0,46 °C em diferentes concentrações e épocas do ano. O gás causador do segundo maior aumento da temperatura média global depois do CO_2 foi o NO_2 , dependendo da sua concentração na atmosfera e do período do ano os valores de aumento de temperatura média global variaram entre 0,48 e 1,22 °C. Um aumento não expressivo na temperatura média global em relação às variações das concentrações dos outros gases é observado quando alteramos a concentração de CFC's 11 e 12 na atmosfera, a partir dessa mudança de concentração observamos valores de temperatura média global variando entre 0,4 a 0,29 °C dependendo da época do ano.

Comparando os resultados obtidos no trabalho com a literatura proposta na metodologia observamos coerências entre os resultados, assim concluímos que o modelo GREB implementado com a nova parametrização proposta neste trabalho pode ser usado para fazer simulações climáticas longas simplificadas. E tendo em vista que é um modelo que usa equações simplificadas logo se torna viável o uso dele para pesquisas em instituições e universidades que não dispõem de sofisticados recursos computacionais.

REFERÊNCIAS

CHEN, F.; DUDHIA, J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. **Mon. Wea. Rev.**, v. 129, p. 569-585. 2001.

DOMMENGET, D.; FLOTER, J. Conceptual understanding of climate change with a globally resolved energy balance model. **ClimDyn**. DOI 10.1007/s00382-011-1026-0. March 2011.

EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational Mesoscale Eta Model. **J. Geophys. Res.**, v.108, p. 8851. 2003.doi:10.1029/2002JD003296.

FOURIER, J. General commentson the temperatures of the earth and planets. **Annales de Chemieet de Physique**, v. 27, p. 136-167. 1824.

FUGLESTVEDT, J.; BERNTSEN, T.; GODAL, O.; SAUSEN, R.; SHINE, K.; AND SKODVIN, T. Metrics of climate change: Assessing radiative forcing and emission indices. **Clim. Change**, v. 58, p. 267-331.2003.

HANSEN, J. et al. Efficacy of climate forcings. **J. Geophys. Res. Atmos.**, v. 110, D18104.2005.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC) .**Climate change**: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.Cambridge, U. K.: Cambridge University Press,2007.p. 996.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC) Climate change: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.-K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P.M.(Eds.).**The Physical Science Basis**.Cambridge: IPCC, 2013.p.33-115.

JAMES, I.N. **Introduction to circulating atmospheres**.Cambridge:CambridgeUniversity Press, 1994.

KIEHL, J. T.; RAMANATHAN, V. Radiative heating due toincreased Co2—the role of H2o continuumabsorption in the 12–18 Mu-M region.**J AtmosphericSci**, v.39, p. 2923-2926. 1982.

LACIS, A.; HANSEN, J.; SATO, M. Climate forcing by stratospheric aerosols.**Geophys.Res. Lett.** v. 19, p. 1607-1610. 1992.

LAUDER, A. R.; ENTING, I. G.; CARTER, J. O.; CLISBY, N.; COWIE, A. L.; HENRY, B. K.; RAUPACH, M. R. Offsetting methane emissions. An alternative to emission equivalence metrics. Int. **J. Greenh. Gas Control**. v. 12, p. 419-429. 2013.

LIOU K. N. **An Introduction to atmospheric radiation**.,2. ed. [S.l.]: Academic Press: 2002.p. 583.(International Geophysics Series, v. 84).

MYHRE, G.; HIGHWOOD, J. E.; SHINE, P. K.; STORDAL, F. New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases. **Geophysical Research Letters**, v. 25, p. 2715-2718, July. 1998.

O'NEILL, B. The jury is still out on global warming potentials. **Clim. Change**, v. 44, p. 427-443. 2000.

SEMENOV, S. M.; POPOV, I. O. Comparative estimates of Influence of changes in carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and water vapor concentrations on radiation-equilibrium temperature of earth's surface. **Russian Meteorology and Hydrology**. v. 36, n.8, p. 520-526. 2011.

SMITH, S.; WIGLEY, M. Global warming potentials: 1. Climatic implications of emissions reductions. **Clim. Change**, v. 44, p. 445-457. 2000.

TOLENTINO, M. ; ROCHA-FILHO, R.C. A química no efeito estufa. **Química Nova na Escola**, n. 8, nov. 1998.

XUE, Y.; SELLERS, P. J.; KINTER, J. L.; AND SHUKLA, J. A simplified biosphere model for global climate studies. **J. Clim.**, v. 4, p. 345-364. 1991.