



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**Influência da Constante Solar e dos Parâmetros Orbitais  
da Terra nas Variações do Clima**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Camila Galli Baldini dos Reis**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2015**

**INFLUÊNCIA DA CONSTANTE SOLAR E DOS PARÂMETROS  
ORBITAIS  
DA TERRA NAS VARIAÇÕES DO CLIMA**

---

por

**Camila Galli Baldini dos Reis**

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

**Orientadora: Michelle Simões Reboita**

**Itajubá, MG, Brasil  
2015**



**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Monografia

**INFLUÊNCIA DA CONSTANTE SOLAR E DOS PARÂMETROS  
ORBITAIS  
DA TERRA NAS VARIAÇÕES DO CLIMA**

elaborada por

**Camila Galli Baldini dos Reis**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

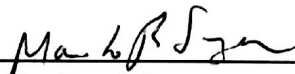
**Comissão Examinadora:**



**Michelle Simões Reboita, Dr<sup>a</sup>. (UNIFEI)**  
(Presidente/Orientador)



**Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)**



**Marcelo Rodrigues, Bel. ocean. (UNIFEI)**

Itajubá, 10 de novembro de 2015 .

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, que acima de tudo me permitiu escolher, entre tantas coisas, estar aqui.

A professora doutora e orientadora Michelle S. Reboita, pela calma, paciência e dedicação durante todo esse intenso processo de aprendizagem e desenvolvimento.

Aos meus outros professores com os quais tive a oportunidade de desenvolver e aprimorar meu senso crítico, minha habilidade de escrita e compreensão e grande parte da minha bagagem acadêmica.

Aos meus pais, por me apoiarem incondicionalmente e nunca deixarem que o desânimo tomasse as rédeas da minha vida, obrigada por acreditarem em mim.

Ao meu irmão, que usou de palavras tão poucas vezes mas tão certas.

Ao meu padrinho, pelas inúmeras caronas nas madrugadas e nos finais de semana para que eu pudesse estar em casa e renovar minhas energias.

A Tailine, por ter me escutado e me incentivado, por ter sido amiga e muitas vezes razão. Obrigada por acreditar em mim e por sempre estar onde eu precisei, com toda certeza você foi fundamental na minha conquista.

Ao meu noivo, que em tão pouco tempo e mesmo a milhares de quilômetros de distância me incentivou todos os dias com mensagens e carinho.

Aos meus amigos de classe, por terem sido mais que colegas e por terem compartilhado momentos, sonhos, festas, resumos e listas, nada teria sido tão bom se vocês não estivessem estado lá.

Aos meu pais, Dolores e Marco,

“...Viver  
E não ter a vergonha  
De ser feliz  
Cantar e cantar e cantar  
A beleza de ser  
Um eterno aprendiz

Ah meu Deus!  
Eu sei, eu sei  
Que a vida devia ser  
Bem melhor e será  
Mas isso não impede  
Que eu repita  
É bonita, é bonita  
E é bonita...”

O que é, O que é - Gonzaguinha

*“Uma nuvem não sabe por que se move  
em tal direção e em tal velocidade,  
era o que o manual tinha a dizer.  
Sente um impulso...  
é para este lugar que devo ir agora.  
Mas o céu sabe os motivos e desenhos  
por trás de todas as nuvens,  
e você também saberá,  
quando se erguer o suficiente  
para ver além dos horizontes.”*

Richard Bach

## **RESUMO**

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **INFLUÊNCIA DA CONSTANTE SOLAR E DOS PARÂMETROS ORBITAIS DA TERRA NAS VARIAÇÕES DO CLIMA**

AUTOR(A): CAMILA GALLI BALDINI DOS REIS  
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA  
Local e Data da Defesa: Itajubá, 10 de novembro de 2015.

O clima da Terra apresenta variações desde milhares de anos atrás, mesmo quando o homem não existia. Para estudar tal variabilidade, emprega-se a modelagem numérica computacional que é uma ferramenta importante para várias áreas da ciência, como a Meteorologia. Assim, o objetivo desse estudo foi investigar, através do modelo *Educational Global Model* (EdGCM), as alterações climáticas naturais devido às forçantes: constante solar e os parâmetros orbitais de Milankovitch (excentricidade da órbita e obliquidade do eixo de rotação da Terra). Entre os resultados têm-se que as simulações com parâmetros mais diferentes do atual como excentricidade de 0,25, mostram um clima mais quente entre 5°C a 10°C comparados aos valores atuais para todo o globo. Para valores de inclinação altos observou-se temperaturas 20 graus mais frio que a temperatura atual para o equador e 18 graus mais quente para as médias latitudes. Os resultados obtidos permitiram um melhor entendimento de como alterações nos parâmetros orbitais podem afetar o clima da Terra.

Palavras-chave: EdGCM. Parâmetros orbitais da Terra. Constante solar. Clima



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Excentricidade da Terra.....	5
FIGURA 2 – Obliquidade da Terra.....	5
FIGURA 3 – Movimento de precessão comparado ao de um pião.....	6
FIGURA 4 – Interface da janela de simulações do EdGCM.....	3
FIGURA 5 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 21,5° e a controle.....	3
FIGURA 6 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 24,5° e a controle.....	3
FIGURA 7 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 0° e a controle.....	3
FIGURA 8 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 50° e a controle.....	3
FIGURA 9 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de excentricidade de 0 UA e a controle.....	3
FIGURA 10 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de excentricidade de 0,25 UA e a controle.....	3
FIGURA 11 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de luminosidade 5% mais intensa e a controle.....	3
FIGURA 12 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, obliquidade igual a 21,5° e 24,5°.....	3
FIGURA 13 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, obliquidade igual a 0°, 45° e 50°.....	4
FIGURA 14 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, excentricidade igual a 0 e 0,25, e luminosidade 5% mais intensa.....	4

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Valores utilizados na simulação controle.....	17
TABELA 2 - Valores utilizados na simulação de excentricidade.....	17
TABELA 3 - Valores utilizados na simulação de inclinação.....	17
TABELA 4 - Valores utilizados na simulação da constante solar.....	17

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

EdGCM – *Educational Global Climate Model*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

GCM II – *Global Climate Model II*

EVA – *EdGCM Visualization Application*

UA – *Unidade Astronômica*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1. Variações climáticas.....	3
2.2. Parâmetros orbitais de Milankovitch.....	3
2.2.1. Excentricidade.....	4
2.2.2. Obliquidade.....	5
2.3. Precessão.....	5
2.4. Constante solar.....	6
2.5. Estudos relacionando a variação dos parâmetros orbitais da Terra e alterações no clima terrestre.....	6
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>8</b>
3.1. EdGCM.....	8
3.2. EVA.....	9
3.3. Descrição das simulações.....	9
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>21</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O clima da Terra sofreu variações, desde milhares de anos atrás, antes mesmo do surgimento do homem. O termo “variações climáticas” significa as alterações dos elementos climáticos (por exemplo: temperatura do ar e precipitação), identificadas no globo terrestre, por longos períodos de tempo (IPCC, 2014). Essas alterações podem se dar tanto por ação antrópica como por influência de fatores naturais.

Os fatores naturais que causam variações no clima do planeta podem ser forçantes externas (ao planeta) tais como a constante solar e os parâmetros orbitais da Terra; ou forçantes internas tais como os oceanos e a dinâmica atmosférica sobre a superfície do planeta. As forçantes internas influenciam o clima bem como o clima influencia as mesmas, existindo então um efeito de feedback (HARTMANN, 1994).

O uso de modelos numéricos computacionais tem se tornado cada vez maior para o estudo das variações climáticas. A possibilidade de simular cenários passados e futuros é altamente vantajosa para cientistas que buscam compreender o comportamento e as alterações que o clima do planeta teve e ou poderá ter. Entretanto, para a aplicação desses modelos é necessário que se tenha acesso à supercomputadores e grande conhecimento de programação. Diante dessas necessidades limitantes foi desenvolvido pela Universidade Columbia o modelo *Educational Global Climate Model* (EdGCM), que é um modelo educacional que possibilita a modelagem numérica a partir de *desktops* e *notebooks*. É importante destacar que o EdGCM é um modelo mais simplificado; educadores e pesquisadores que não tem acesso a supercomputadores podem facilmente desenvolver e publicar estudos a nível científico utilizando este modelo, como já vem sendo realizado.

Um experimento com esse modelo que pode ser mencionado é o do trabalho de Rivera e Khan (2012), onde os autores utilizaram o EdGCM para simular como o aumento da obliquidade do eixo de rotação da Terra impacta o clima terrestre. Já em Maenza e Compagnucci (2010), o EdGCM foi utilizado a fim de mostrar respostas às

mudanças de irradiância e CO<sub>2</sub> para o Mínimo de Maunder<sup>1</sup>. Outro estudo com o EdGCM foi realizado por Reboita, Pimenta e Natividade (2015) que avaliaram a influência de diferentes ângulos de inclinação do eixo de rotação da Terra nas temperaturas do planeta.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar e expor de forma didática, quais os impactos climáticos o planeta Terra sofreria quando da ocorrência de mudanças na obliquidade (inclinação do eixo de rotação da Terra), na excentricidade orbital e na constante solar, a partir das simulações executadas com o EdGCM.

Esse estudo é importante pois a influência do homem na variação climática vem sendo cada vez mais estudada a fim de compreender qual a magnitude da ação antrópica. Entretanto, existem registros de mudanças significativas no clima desde antes da existência do homem e, essas mudanças, ocorreram devido a forçantes naturais, tornando o entendimento das alterações por fatores naturais de extrema importância para que se possa compreender de fato o que é resultante da influência antrópica e natural.

Por fim, tem-se que o estudo está organizado em 5 capítulos. O primeiro apresentou a introdução do trabalho, o segundo apresenta uma revisão bibliográfica, o terceiro a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, o quarto mostra os resultados obtidos e o quinto as considerações finais e conclusões.

---

<sup>1</sup> Período entre 1645 e 1715 durante a Pequena Idade do Gelo que ocorreu em meados do século XIV até meados do século XIX

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Variações climáticas

Segundo o IPCC (2014, tradução minha), uma alteração no estado do clima, que pode ser identificada (por exemplo, por meio de testes estatísticos) por mudanças na média e/ou a variabilidade das suas propriedades e que persiste durante um longo período de tempo, tipicamente décadas ou mais. (IPCC, 2014, tradução minha).

Sabe-se que, mesmo o homem não estando presente em grande parte da história do planeta, surgindo apenas no período mais recente da escala de tempo geológica, a Terra tem sempre apresentado um clima extremamente complexo (HARTMANN, 1994).

Tanto no início da Era Mesozóica<sup>2</sup> como início da Era Cenozóica<sup>3</sup>, a Terra exibiu clima quente (Era Mesozóica apresentou 30° a 33°C na média global). Entretanto, na passagem do período Terciário<sup>4</sup> para o Quaternário<sup>5</sup> da Era Cenozóica, surgiram as glaciações quaternárias (SILVA e PAULA, 2009). Cientificamente, é de senso comum que as últimas glaciações ocorridas no Quaternário, aconteceram devido a pequenas variações cíclicas ocorridas no percurso que a Terra faz em torno do Sol. Essas variações são consequências do aumento ou diminuição (mudanças) da força gravitacional, à medida que os planetas se aproximam ou se afastam. Estas mudanças são chamadas de Ciclos de Milankovitch. Mesmo que estas não sejam suficientes para sozinhas causarem um resfriamento expressivo do planeta, as pequenas variações na radiação solar juntamente com outros fatores, ocasionam uma reação em cadeia que conduz a uma glaciação (EEROLA, 2003).

---

<sup>2</sup> Era geológica que iniciou-se a cerca de 250 milhões de anos atrás, marcada por intenso vulcanismo

<sup>3</sup> Era geológica dividida em dois períodos: Terciário e Quaternário (1 milhão de anos atrás)

<sup>4</sup> Período geológico ocorrido há aproximadamente 60 milhões de anos atrás

<sup>5</sup> Período geológico ocorrido há aproximadamente 1 milhão de anos atrás)

## 2.2 Parâmetros orbitais de Milankovitch

Baseado nas variações latitudinais e sazonais da radiação que a Terra recebe do Sol, o matemático Milankovitch desenvolveu uma teoria que afirma que devido aos movimentos que a Terra faz em torno do Sol, a variação de três elementos da geometria Terra-Sol combinados (excentricidade da órbita da Terra, a obliquidade do eixo de rotação do planeta e a precessão) produzem variações na quantidade de energia solar que atinge o planeta. Esses elementos são conhecidos como parâmetros de Milankovitch (HARTMANN, 1994, GRAHAM, 2000; REBOITA, PIMENTA e NATIVIDADE, 2015). Na sequência, cada parâmetro é definido.

### 2.2.1 Excentricidade

A excentricidade da Terra é o modo como a órbita da Terra se afasta do formato circular, se aproximando de uma forma mais elíptica (Fig. 1). Como a Terra apresenta sua órbita próxima a uma elipse, o Sol está em um dos focos, se tivesse uma órbita é circular, o Sol encontrar-se-ia no meio do círculo (HARTMANN, 1994).

A excentricidade atual da órbita da Terra é 0,0167 UA (unidade astronômica), e sua escala varia de 0 a 1, sendo que quanto mais aproximar de zero apresentaria uma órbita circular e quanto mais se aproximar de um apresentaria uma órbita elíptica.

Devido ao fato da excentricidade da Terra não ser circular, a distância entre o Sol e raio do movimento varia de acordo com a posição em que a Terra se encontra na órbita, e essa diferença tem grande importância na quantidade de radiação que a Terra recebe; quando a Terra se encontra no periélio (ponto na órbita mais próximo do Sol) a quantidade de energia recebida pela Terra é maior e quando se encontra no ponto mais distante em relação ao Sol (afélio) a Terra receberá menor intensidade de energia (MESQUITA, 2010). Entretanto, essa diferença seria de apenas 6,7% e não afetaria a temperatura do planeta a ponto de deixá-lo mais frio (REBOITA, PIMENTA e NATIVIDADE, 2015).

O período no qual a excentricidade da órbita da Terra ao redor do Sol varia de elíptica para quase circular em ciclos irregulares de 90.000 a 100.000 anos



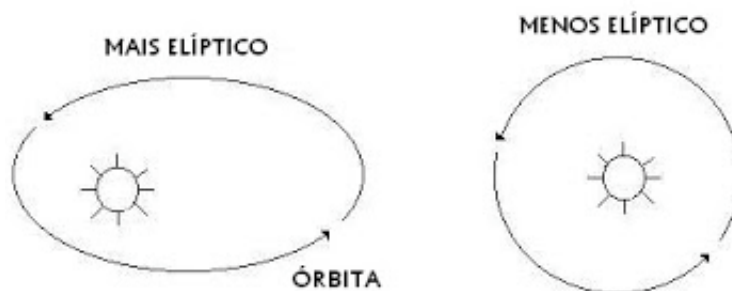


Fig. 1- Excentricidade da Terra (CINTRA, 2010)

### 2.2.2 Obliquidade

A inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao seu plano orbital é definida como obliquidade. Esta varia entre  $22^{\circ}$  e  $24,5^{\circ}$  com um período médio de cerca de 41 mil anos e é responsável pelas diferentes estações do ano, principalmente nas altas latitudes (HARTMANN, 1994). O seu valor atual é  $23,44^{\circ}$ .

A obliquidade define a insolação recebida por latitude, quanto maior os valores de obliquidade maior será a variação da insolação entre os trópicos e latitudes altas, porém se esta for zero, então nos polos a média anual da insolação também será zero (REBOITA, PIMENTA, NATIVIDADE, 2015).

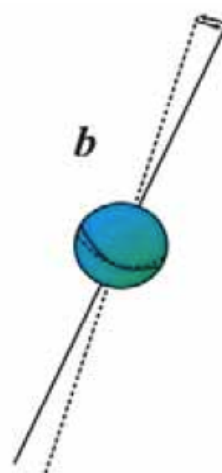


Fig. 2 – Obliquidade da Terra (modificado de Silva, 2007)

Com o aumento da obliquidade tem-se um aumento da insolação anual nas latitudes médias e altas e na variação sazonal da insolação em altas latitudes (HARTMANN, 1994, p. 304).

## 2.3 Precessão

Precessão é a mudança na orientação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano orbital.

Segundo Kilhian (2009), a região equatorial do globo tende a sofrer maior força gravitacional do Sol, o que faz com que essa força tente endireitar a Terra. Como existe o movimento de rotação, esse tentativa de endireitar resulta em uma leve mudança do eixo de orientação. Ao girar, a Terra realiza um bamboleio da mesma forma que um pião quando esta girando (fig. 3), diferenciando-se na velocidade e constância. No caso da Terra, um ciclo completo leva cerca de 26.000 anos”.

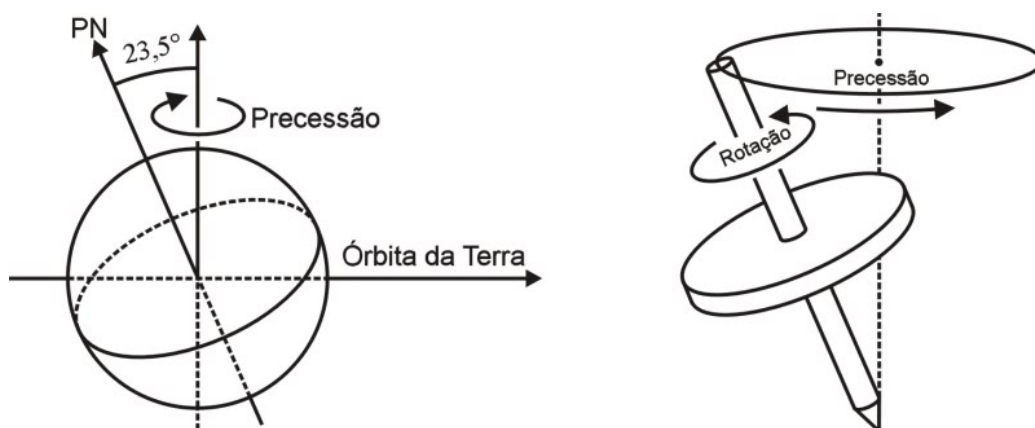


Fig.3 – Movimento de precessão comparado ao de um pião (KILIHIAN, 2009)

## 2.4 Constante solar

Define-se constante solar como: energia solar que cada metro de superfície da camada superior da atmosfera recebe por unidade de tempo, perpendicular à radiação solar a qual está exposta (DUFFIE e BECKMAN, 2013). O valor da constante solar é  $1366,6198 \text{ W/m}^2$ .

## 2.5 Estudos relacionando a variação dos parâmetros orbitais da Terra e alterações no clima terrestre

Huybers (2011) testou grandes combinações anormais de precessão e obliquidade para verificar se estas explicam as deglaciações durante o Pleistoceno superior. Ele encontrou que a precessão atinge o máximo durante quase todos os períodos que há obliquidade acima da média, mas o contrário não acontece. Portanto, a precessão tenderá influenciar o tempo de deglaciação dentro de um ciclo de obliquidade, mas a obliquidade fundamentalmente governará o intervalo entre glaciações.

Rivera e Khan (2012) utilizaram o EdGCM para simular, por exemplo, o impacto de elevada obliquidade no clima global. Para isso, as concentrações de vários gases de efeito estufa foram considerados constantes, bem como a luminosidade solar, no modelo buscando assim analisar o impacto isolado da obliquidade (forçada ao máximo em  $28,4^\circ$ ) e compará-los com observações disponíveis. Os resultados iniciais encontrados mostraram que a temperatura média global do ar na superfície para o período de 1988 a 2008 aumentou de  $13,4^\circ$  para  $14,2^\circ\text{C}$ , concluindo assim que existe um impacto da obliquidade no clima terrestre através da alteração da radiação solar global absorvida. Também, através dos valores tanto observados quanto calculados, os autores afirmaram que a obliquidade poderia aumentar durante a ocorrência de grandes terremotos e tsunamis.

Feng e Bailer-Jones (2015) exploraram o papel dos elementos orbitais (obliquidade e precessão) nas deglaciações no Pleistoceno<sup>6</sup> através da modelagem da variação do volume de gelo em uma abordagem bayesiana. Eles buscaram medir os tempos de deglaciação em resposta dessas e encontraram que a obliquidade combinada com a precessão foram os principais desencadeadores das 12 principais deglaciações no Pleistoceno Superior e que a obliquidade sozinha pode engatilhar menores deglaciações durante todo o Pleistoceno.

Verstegen e Schiltz (2014), investigaram se, há milhões de anos atrás, a Terra congelou completamente ou apenas parcialmente, através de simulações do nível de  $\text{CO}_2$  na atmosfera bem como a luminosidade solar. Eles encontraram, através das simulações, que uma mudança na luminosidade solar afetaria

---

<sup>6</sup> Período quaternário ocorrido entre 1,8 milhão a 11.000 anos atrás

fortemente o sistema solar a ponto de perturbar o clima como é conhecido hoje. Os episódios de glaciação da Terra não seriam tão severos com as quantidades presentes de gases do efeito estufa, porém são prováveis mudanças profundas quando a luminosidade solar é reduzida.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 EdGCM

O EdGCM é um modelo computacional, desenvolvido através do projeto de mesmo nome, pela Universidade Columbia em parceria com a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Este tem como base o GCM II (*Global Climate Model II*), modelo desenvolvido pelo Instituto Goddard para estudos espaciais que pertence a NASA.

Segundo o *The Basic Guide to EdGCM* (2003, p.14, tradução minha): O EdGCM é um modelo tridimensional que resolve numericamente as equações físicas de conservação de energia, massa, momentum e umidade, assim como as equações do estado e que tem resolução horizontal de 8° de latitude por 10° de longitude, 9 camadas verticais na atmosfera estendendo-se até 10 mb, e 2 camadas hidrológicas no solo. [...] Partículas de nuvens, aerossóis e alguns gases (por exemplo, dióxido de carbono, metano, e óxido nitroso) são explicitamente incorporados no esquema de radiação. [...] Temperaturas da superfície do mar (TSMs) são calculadas usando modelo derivado de fluxos de energia na superfície e de convergências específicas de calor no oceano. As convergências de calor no oceano variam sazonalmente e regionalmente, caso contrário são fixas. Certas condições de contorno necessárias para simulações (por exemplo, os níveis de vários gases atmosféricos, luminosidade solar) pode facilmente ser ajustado para simulações personalizadas. Outras condições de contorno, geralmente aquelas que são geograficamente dependentes (por exemplo, topografia e vegetação) não podem ser ajustadas pelos usuários.

O EdGCM tem uma interface gráfica simplificada que permite que qualquer pessoa instale e utilize o modelo sem necessidade de um supercomputador. Um exemplo dessa interface é mostrado na figura 3.

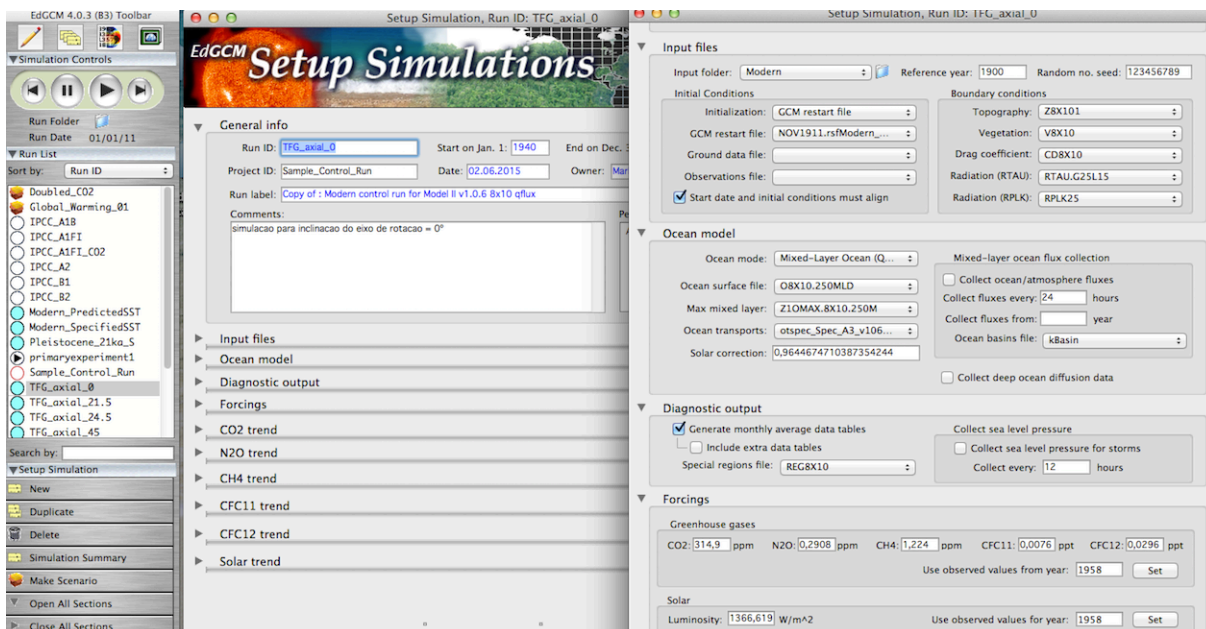


Fig. 4 – Interface da janela de simulações do EdGCM

### 3.2. EVA

O EVA foi desenvolvido dentro do projeto EdGCM da Universidade de Columbia. Esse *software* é uma ferramenta de visualização livre que trabalha com os arquivos que o EdGCM gera, possibilitando que o usuário consiga criar gráficos, imagens verticais da atmosfera, projetar séries temporais, entre outras possibilidades. Além disso, o *software* permite que o usuário trabalhe com as simulações sem que o EdGCM esteja sendo executado.

### 3.3 Descrição das Simulações

Nesse estudo foi utilizado o EdGCM versão 4.0.3 (B3). O período de estudo compreende de 1940 a 2010. Foram realizadas 8 simulações. Na simulação controle foram empregados os valores padrões do modelo: excentricidade (0,0167 UA), inclinação do eixo da Terra (23,44 graus) e constante solar (1366,6198 W/m<sup>2</sup>) (Tab.1). Já nos experimentos numéricos foram utilizados valores alterados de excentricidade (Tab.2), inclinação do eixo da Terra (Tab.3) e constante solar (Tab.4).

Tabela 1 - Valores utilizados na simulação controle

Simulação Controle	Valores
Excentricidade (UA)	0,0167
Inclinação (graus)	23,44
Constante solar ( $W/m^2$ )	1366,6198

Tabela 2 - Valores utilizados nas simulações de excentricidade

Simulação Excentricidade	Valores (UA)
Excentricidade 0	0
Excentricidade 0,25	0,25

Tabela 3 - Valores utilizados nas simulações de inclinação

Simulação Inclinação	Valores (graus)
Inclinação 0	0
Inclinação 21,5	21,5
Inclinação 24,5	24,5
Inclinação 50	50

Tabela 4 - Valor utilizado na simulação da constante solar

Simulação Constante Solar	Valores ( $W/m^2$ )
5% mais intensa	1434,95

A partir das simulações, foram calculadas médias sazonais e anuais da temperatura do ar e calculada a diferença entre modelos experimentos e a simulação controle para a geração de gráficos. Para tanto, foi utilizado o *software* EVA (EdGCM Visualization Application), uma ferramenta disponibilizada pelo EdGCM.

## 4. RESULTADOS

Para facilitar o entendimento dos resultados obtidos, estes foram divididos em 3 partes, sendo cada uma referente a um parâmetro analisado.

### 4.1 Inclinação do eixo de rotação da Terra

A partir do EdGCM foram gerados mapas globais de temperatura média anual na superfície para diferentes valores de inclinação  $0^\circ$ ;  $21,5^\circ$ ;  $24,5^\circ$  e  $50^\circ$ . Esses mapas são produtos resultantes da diferença entre as simulações com alteração na inclinação do eixo de rotação da Terra e a simulação controle.

Para as simulações de  $21,5^\circ$  e  $24,5^\circ$ , valores relativamente próximos ao da inclinação real da Terra ( $23,5^\circ$ ), a temperatura apresentou poucas diferenças em relação ao experimento controle. Conforme pode ser observado na figura 5, os valores de temperatura para a simulação de  $21,5^\circ$  foram menores que os obtidos pela simulação controle em quase todo o globo. Isso indica que se a inclinação da órbita da Terra fosse  $2^\circ$  menor do que é, a temperatura média global próxima ao equador seria um pouco maior (aproximadamente  $0,5^\circ\text{C}$ ), e a partir das latitudes média até os polos, a temperatura seria um pouco menor (próximo a  $1^\circ\text{C}$ ). Já, na figura 6, tem-se as diferenças entre a simulação de  $24,5^\circ$  e a controle. Esse experimento também mostra uma pequena variação nos valores da temperatura, porém com situação geral oposta ao caso da figura 5, os valores encontrados nas baixas latitudes seriam menores do que as temperaturas para condição real, e das latitudes médias para os polos os valores seriam maiores.

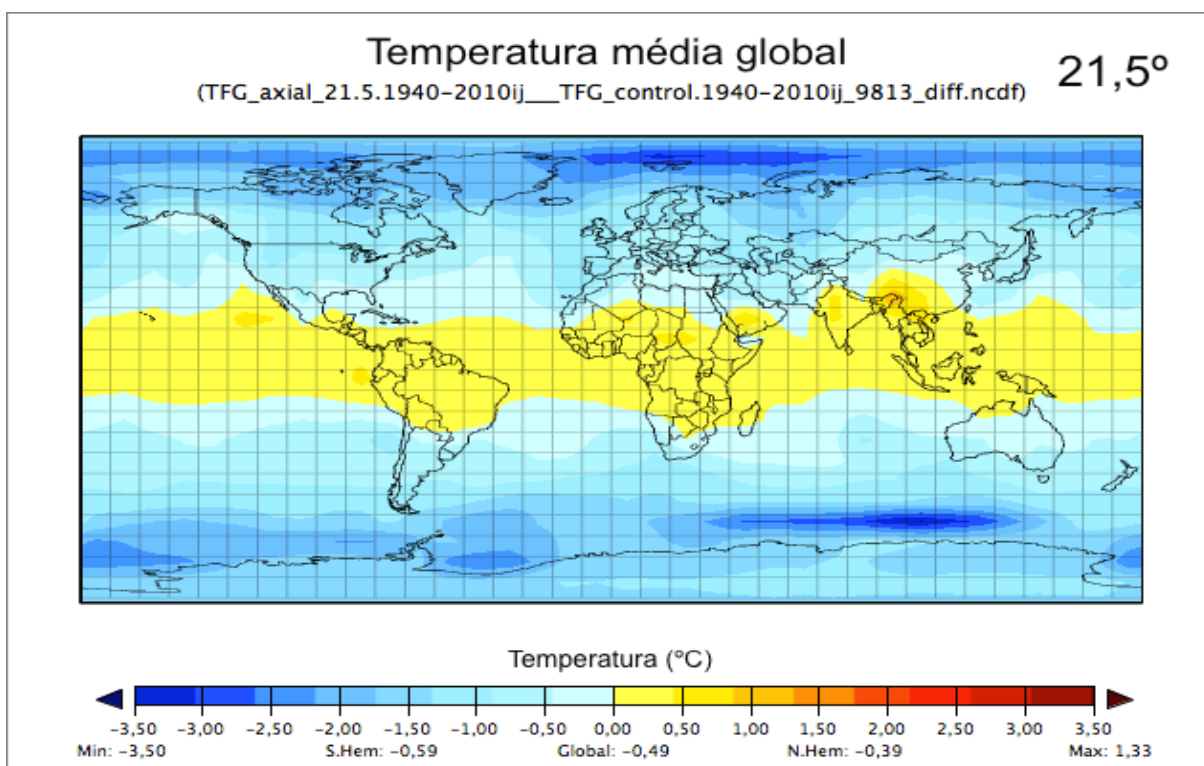


Figura 5 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 21,5° e a controle

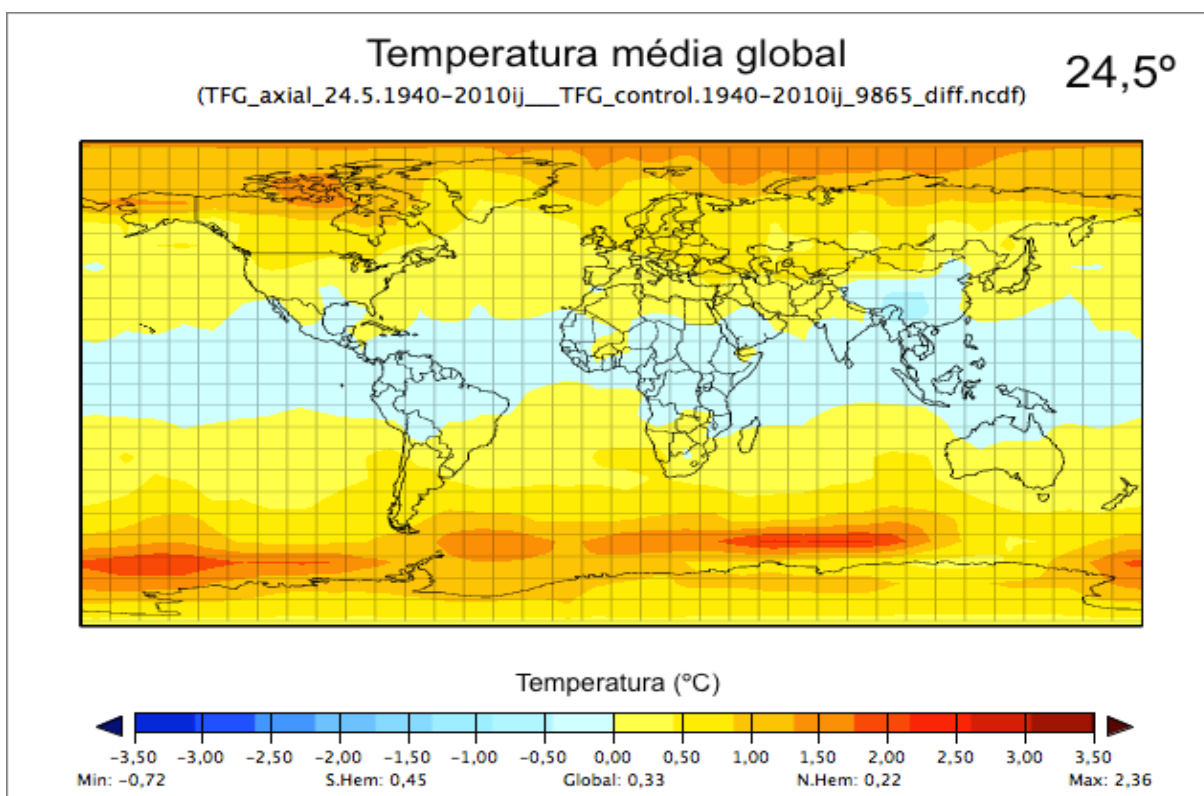


Figura 6 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 24,5° e a controle



No experimento em que obliquidade é nula, a figura 7 mostra que as temperaturas nas baixas latitudes seriam maiores ( $\approx 2^{\circ}\text{C}$ ) do que no experimento controle e menores à medida que se desloca para as latitudes médias ( $\approx$  entre  $2,5^{\circ}\text{C}$  e  $10^{\circ}\text{C}$  mais frios) e polos (chegando no polo sul a valores  $\approx 15^{\circ}$  mais frios). Sendo assim, esse comportamento mostra que haveria um maior aquecimento na região equatorial uma vez que a incidência da radiação solar seria perpendicular a essa região durante o ano todo.

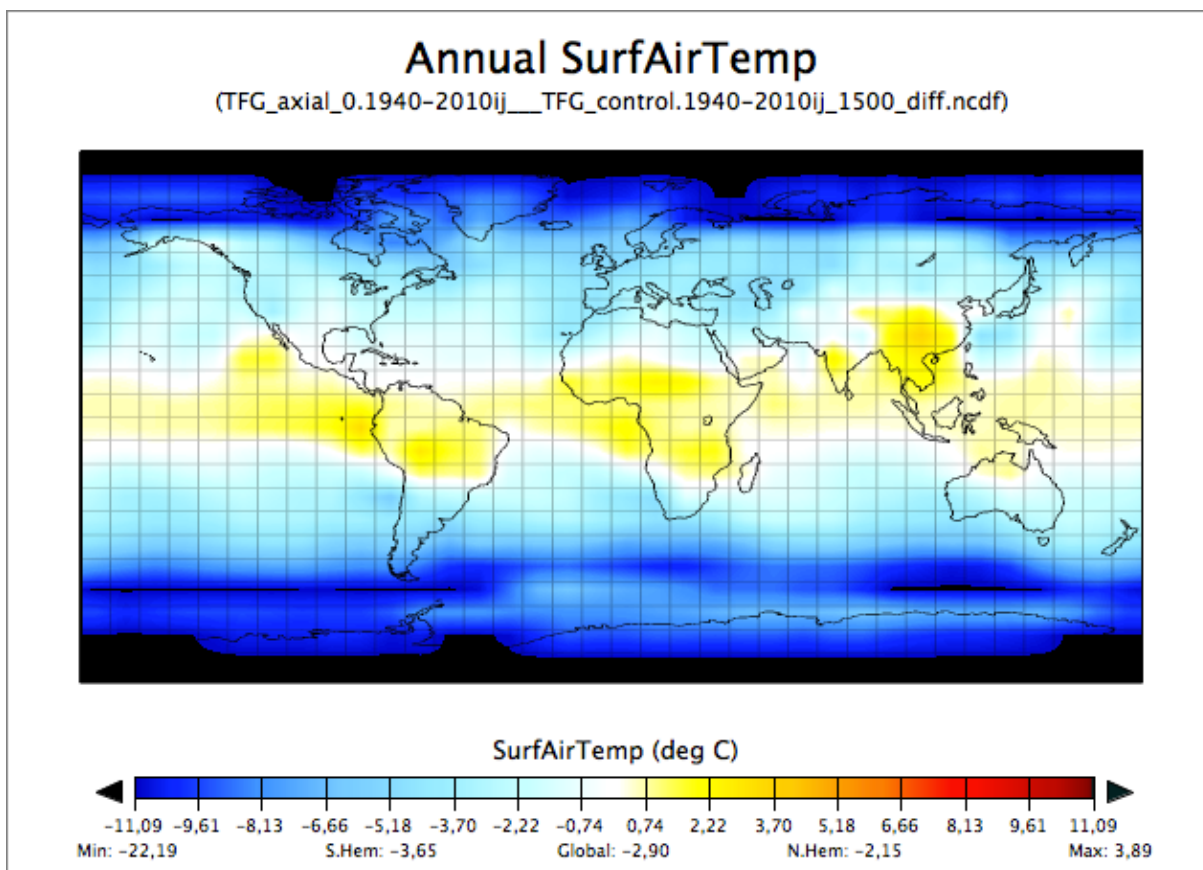


Figura 7 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de  $0^{\circ}$  e a controle

No experimento considerando uma inclinação extrema do eixo de rotação da Terra ( $50^{\circ}$ ), a figura 8 mostra um padrão espacial de temperatura do ar oposto ao obtido no experimento com inclinação nula. As temperaturas nas latitudes baixas seriam menores que as temperaturas do experimento controle, apresentando uma diferença de até  $22^{\circ}\text{C}$ . Já nas latitudes médias e em direção aos polos as temperaturas seriam superiores às da inclinação atual em  $18^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, podendo chegar a uma diferença de até  $40^{\circ}\text{C}$  no polo Norte. Isso mostra que com

essa inclinação, o planeta receberia maior quantidade de energia nas regiões polares, causando maior aquecimento dessas regiões, que na situação atual apresentam camadas de gelo, como a Antártica. Conforme Williams e Pollard (2003), o aquecimento da superfície nessas regiões causaria o derretimento do gelo e evitaria concentrações de neve e essa situação afetaria o albedo planetário. Ao enfraquecer o albedo, resultaria em maior elevação das temperaturas médias anuais.

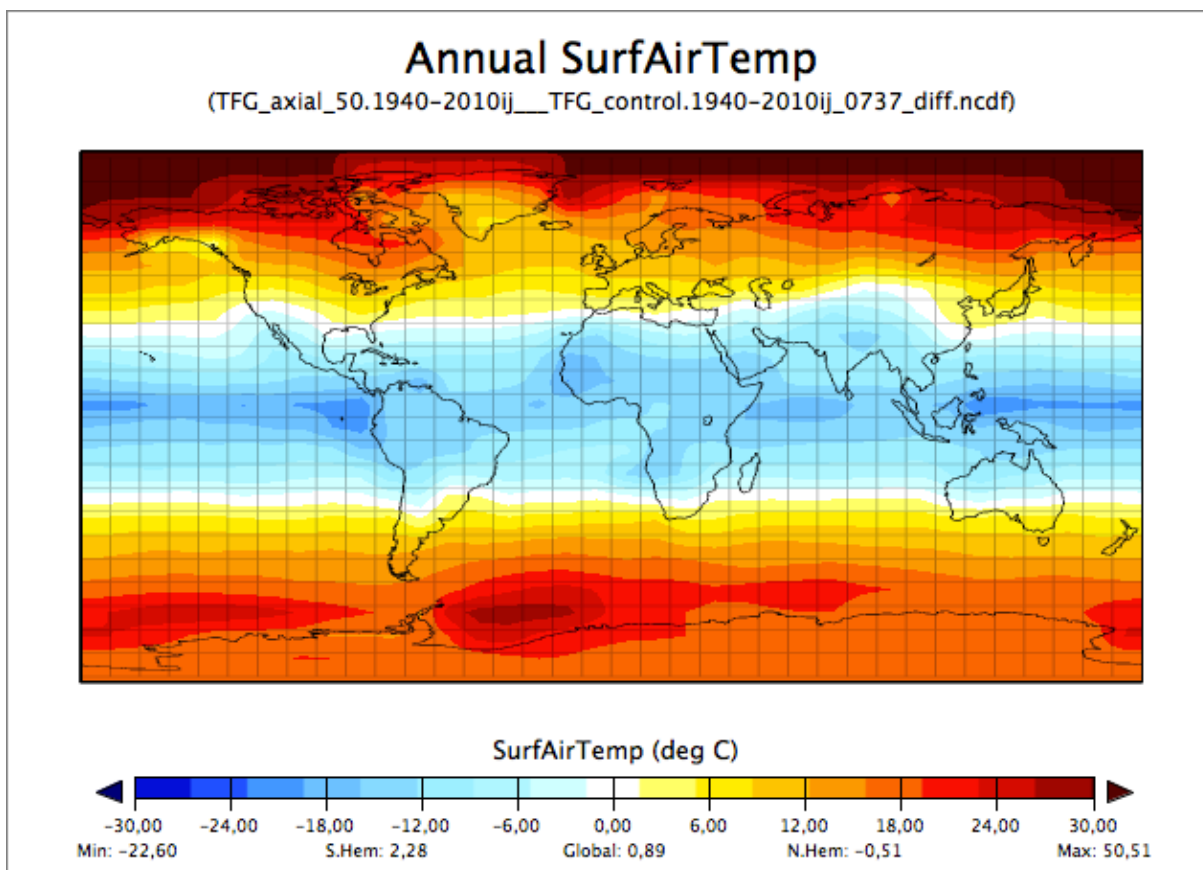


Figura 8 – Diferença da temperatura média global entre a simulação da obliquidade de 50° e a controle

#### 4.2 Excentricidade da Terra

A figura 9 mostra a diferença de temperatura do ar na superfície entre a simulação com excentricidade igual a zero e a controle (excentricidade = 0,0167 UA). É possível notar que existe uma pequena diferença das temperaturas médias caso a excentricidade fosse diferente do que é hoje, ficando em torno de 0,5°C. É importante mencionar que as temperaturas seriam, aproximadamente 0,5°C mais alta em algumas partes do globo e em outras partes 0,5°C mais baixas.

Entretanto, quando o valor da excentricidade é acima da atual, o comportamento do padrão espacial da temperatura do ar encontrado é completamente diferente do atual. O globo inteiro apresentaria temperaturas mais elevadas do que para a excentricidade de 0,0167 UA, com diferenças menores na região de baixas latitudes e maiores em direção aos polos conforme pode ser observado na figura 10. Segundo Berger et al. (2012), uma excentricidade grande diminui a distância Terra-Sol durante o periélio. Essa diminuição faz com que a Terra receba maior quantidade de energia quando está mais perto do Sol. Como, segundo a Lei do Inverso do quadrado, a energia recebida é inversamente proporcional ao quadrado da distância, quando a Terra está no afélio, a quantidade de energia recebida seria muito menor, e a média anual global seria maior do que a encontrada nas condições atuais. Conforme GRAHAM (2000), a diferença entre a quantidade de insolação recebida quanto a Terra está no periélio pode ser até 30% maior que no afélio quando a excentricidade for grande.

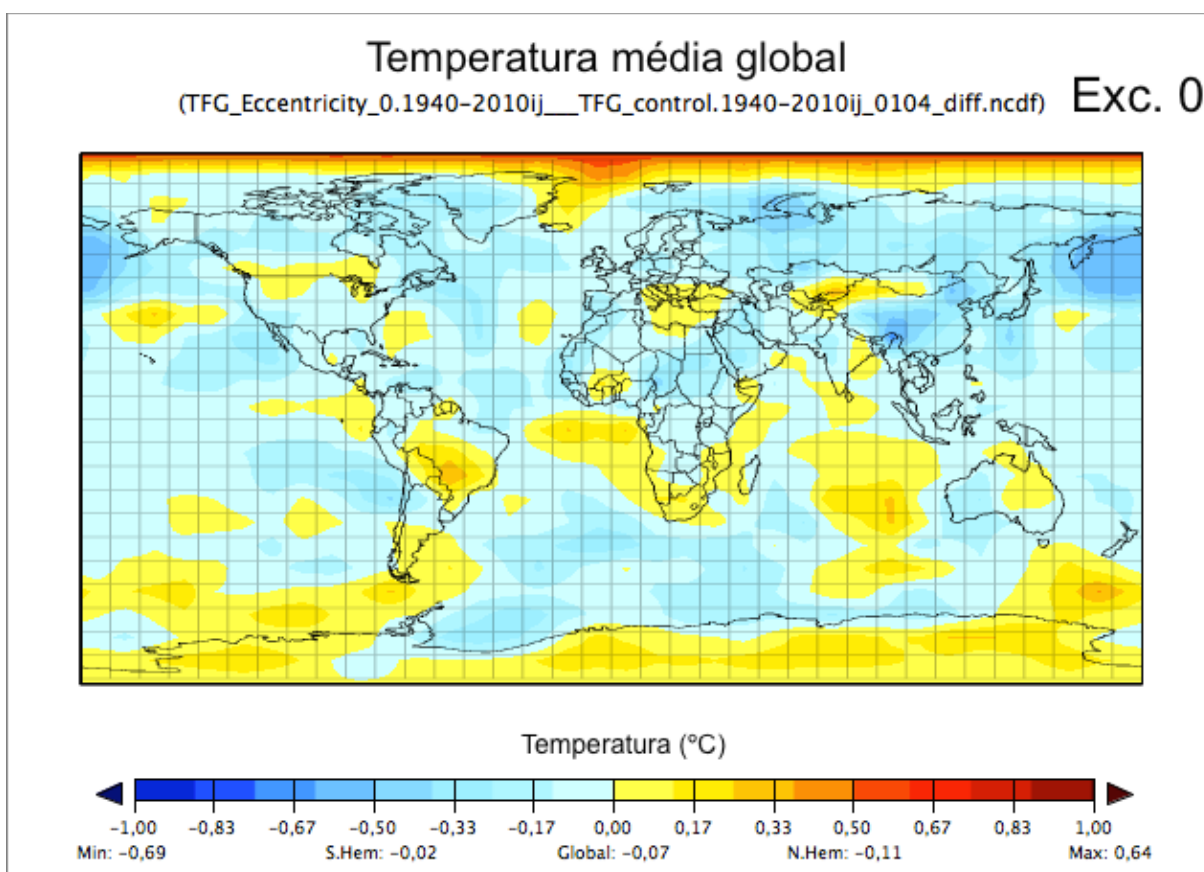


Figura 9 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de excentricidade de 0 UA e a controle

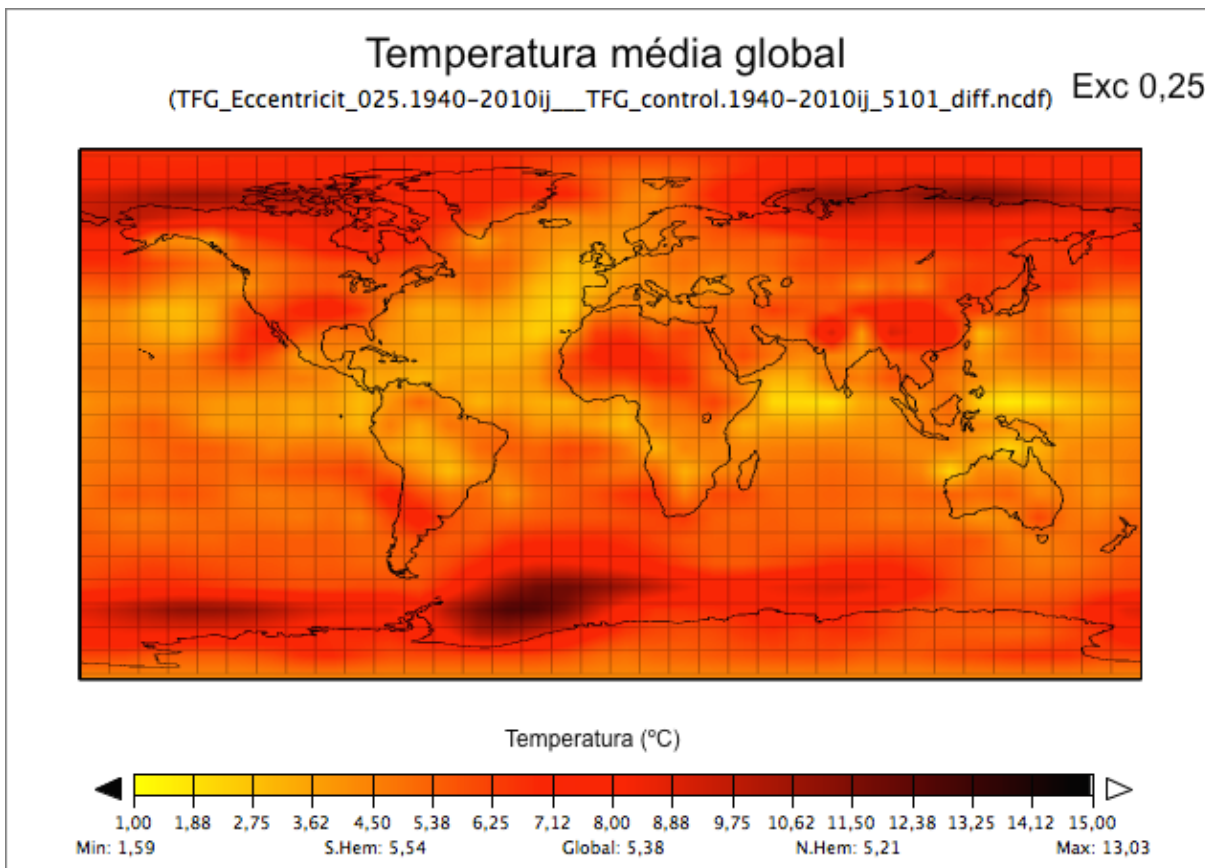


Figura 10 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de excentricidade de 0,25 UA e a controle

### 4.3 Constante solar

A respeito da constante solar (fig. 11), um aumento de 5% do valor atual causaria um aumento das temperaturas em todo o globo. Isso significa que a energia recebida na Terra seria maior do que é atualmente. No polo norte, a diferença chega a 18°C.

Esse tipo de aumento nas temperaturas globais pode causar diversas consequências no planeta como derretimento de geleiras, alterar padrões de chuvas e secas, prejudicar plantações e até mesmo a saúde do homem.

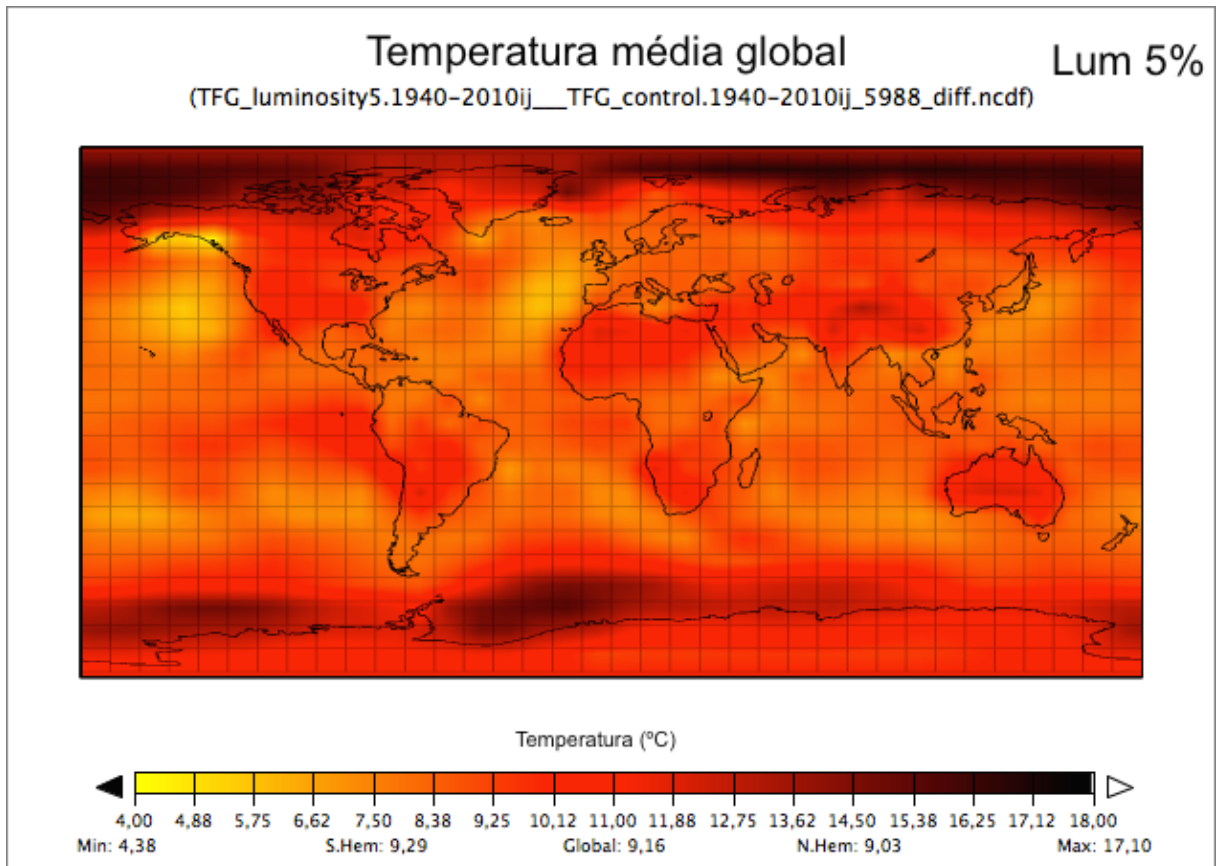


Figura 11 – Diferença da temperatura média global entre a simulação de luminosidade 5% mais intensa e a controle

#### 4.4 Análise da média latitudinal da temperatura do ar na superfície

A fim de comparar a média latitudinal da temperatura do ar na superfície simulada nos diferentes experimentos foram elaboradas figuras 12, 13 e 14.

Como pode ser observado na figura 12, quando colocadas juntas as simulações com pequenas variações da inclinação do eixo da Terra, observa-se que essas mudanças não afetariam a temperatura no globo de modo drástico. Por outro lado, quando comparadas as inclinação mais extremas (Fig. 13), observa-se claramente quão diferente o comportamento da temperatura no globo seria. Obliquidades de 45° e 50° apresentariam polos com temperaturas mais elevadas do que na condição atual, a região equatorial mais fria, e as temperaturas mais elevadas estariam nas regiões subtropicais. Esse aumento da temperatura dos polos e resfriamento do equador afetaria o transporte de calor existente no globo nas condições atuais, onde a inclinação é igual a 23,5°.

### Temperatura do ar na superfície

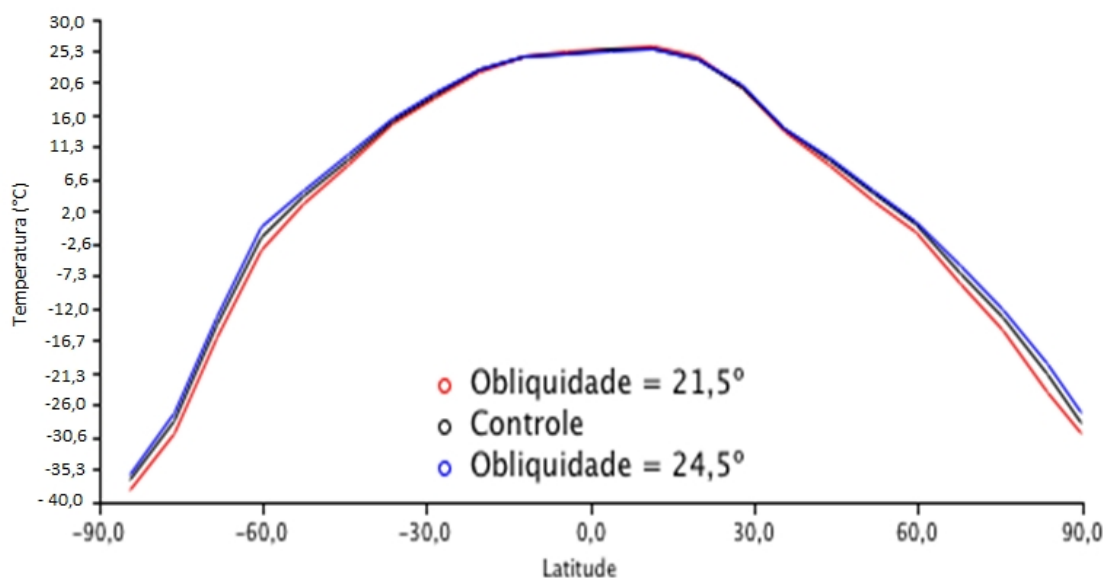


Figura 12 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, obliquidade igual a 21,5° e 24,5°

### Temperatura do ar na superfície

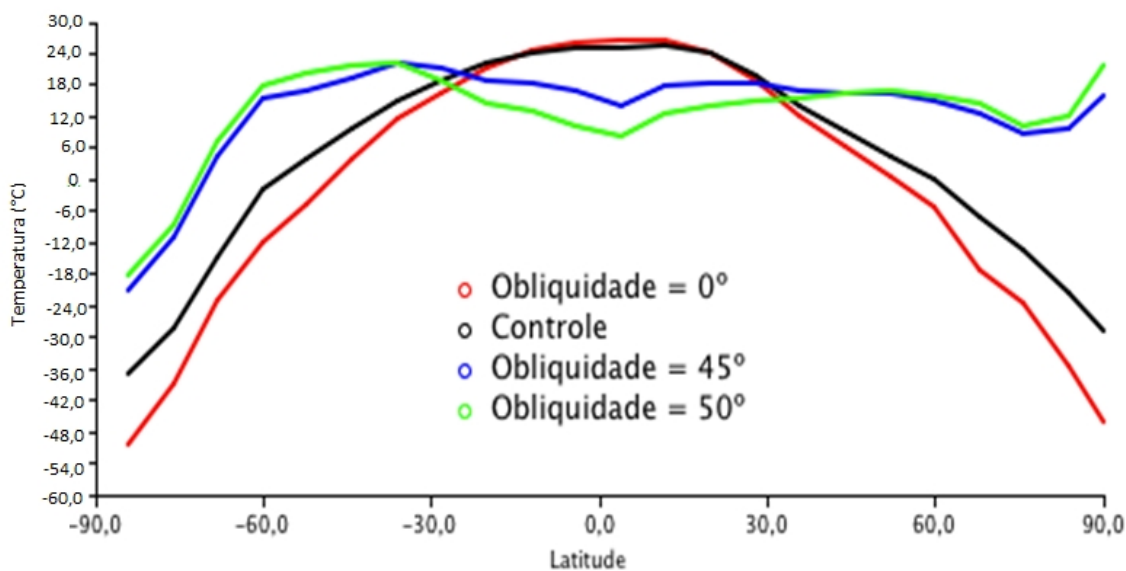


Figura 13 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, obliquidade igual a 0°, 45° e 50°

Com relação as simulações com mudanças na excentricidade e luminosidade, o comportamento da temperatura seria o mesmo (Fig. 14) porém a intensidade seria diferente, com exceção da excentricidade igual a zero, que apresentaria o comportamento quase que idêntico ao do experimento controle (linha vermelha sobrepondo a preta), uma vez que o valor atual não é muito superior a zero (0,0167 UA). Uma excentricidade de 0,25UA apresentaria temperaturas mais elevadas, aproximadamente 7°C e a constante solar 5% mais intensa com temperaturas maiores que 10°C aproximadamente.

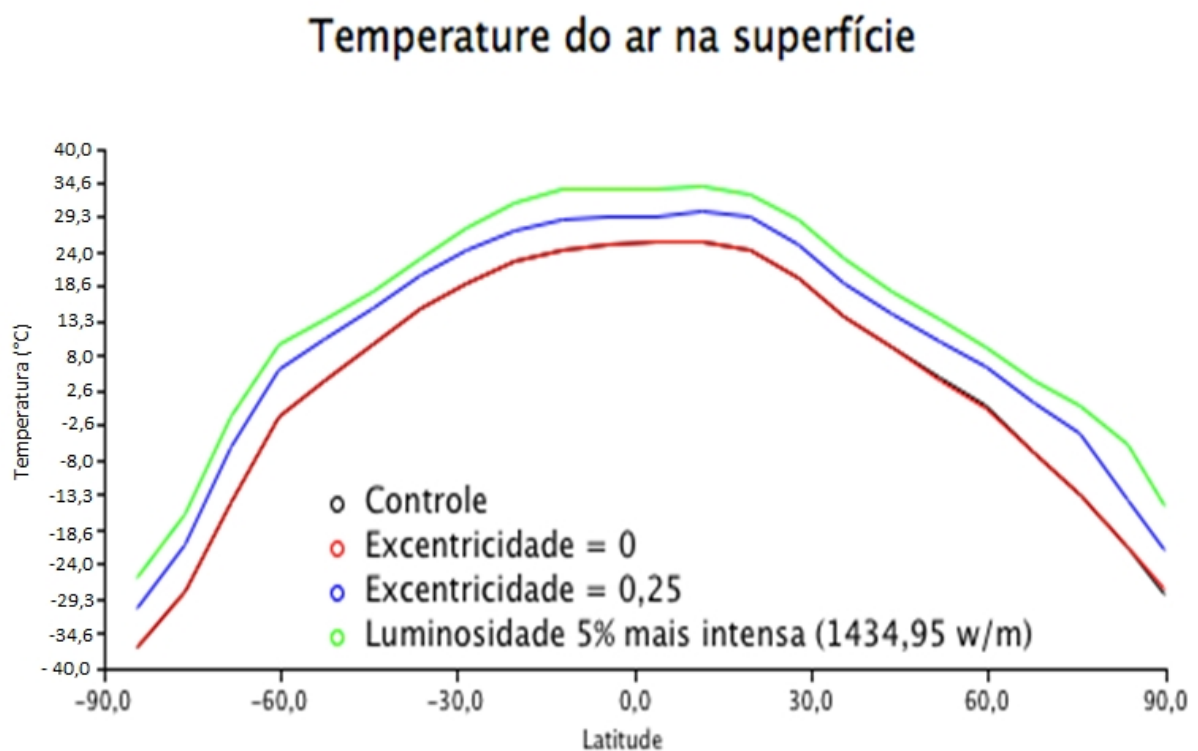


Figura 14 – Média latitudinal da temperatura do ar na superfície nos experimentos: controle, excentricidade igual a 0 e 0,25, e constante solar 5% mais intensa

## 5. CONCLUSÃO

As mudanças nos parâmetros orbitais da Terra têm grande influência no comportamento na temperatura no globo. A excentricidade e a constante solar não alteram o modo como a temperatura se dispõe ao longo das latitudes, mas sim a intensidade que apresenta.

Entretanto, as variações no eixo de inclinação terrestre podem afetar a temperatura tanto em intensidade quanto em disposição no planeta. Inclinações muito maiores afetariam todo o balanço de energia, e inclinações muito menores do que a atual, reduziriam a temperatura em alguns graus porém ela teria o mesmo comportamento, polos mais frios e equador mais quente.

O EdGCM se mostrou como uma ferramenta útil no estudo das variações climáticas, entretanto quando experimentos com valores muito extremos são submetidos a esse, o mesmo apresenta certa instabilidade não executando a simulação como, por exemplo, para valores de inclinação do eixo da Terra superiores a  $60^\circ$ , valores da constante solar acima de 5% mais intensa do que o atual e de excentricidade acima de 0,3. Para todas estas situações, o modelo iniciou as simulações porém não completou todo o período pré-determinado.

Por fim, deixa-se como sugestões para trabalhos futuros:

- Análise de outros elementos como cobertura de neve, albedo a fim de verificar qual impacto estes sofreriam se houvessem variações nos parâmetros orbitais da Terra.
- Análise das célula de circulação de Hadley em cada experimento realizado para observar qual seria a influência da variação dos parâmetros orbitais no transporte de energia



## 6. REFERÊNCIAS

ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Variabilidade, anomalia e mudança climática. Material didático da disciplina LCE306 -Meteorologia Agrícola - Turmas 1,4,5 e 6 Departamento. de Ciências Exatas- setor de Agrometeorologia - ESAL/USP – 2007.

BASTOS, D. C. de O. Apostila Temperatura e Calor para disciplinas Meteorologia e Climatologia Agrícola, Faculdade da Amazônia, 2009.

BEGER, A.; MESINGER, F.; SIJACKI, D. Climate Change: Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects. Springer Science & Business Media, p 57-59, 2012.

CINTRA, E. 2010 O aquecimento global é causado por humanos? Disponível em: <<http://eduardoulhoacintra.blogspot.com.br/2010/05/o-aquecimento-global-e-causado-por.html>>. Acesso em: 10 nov 2015

CHUERUBIM, M.L. Análise da variação da radiação solar na superfície terrestre com base no cálculo da irradiância para diferentes latitudes. Revista Geográfica Acadêmica. Roraima, v.6, n.1, 2002.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4ª edição. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2013, p. 27.

FENG, F.; Bailer-Jones, C. A. L. Obliquity and precession as pacemakers of Pleistocene deglaciations. *Quaternary Science Reviews*. 2014-2015.

GRAHAM, S. 2000. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/>>. Acesso em: 06 out 2015 .

HARTMANN, D. L. Global physical climatology. San Diego: Academic Press, 1994. 407 p. (International geophysics, v.56).

HUYBERS, P. Combined obliquity and precession pacing of late Pleistocene deglaciations. **Nature** v. 480, p.229-232, 2008 .

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working

Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

KILHIAN, K. 2009. O Movimento de Precessão da Terra e Algumas Implicações. Disponível em <<http://obaricentrodamente.blogspot.com.br/2009/11/o-movimento-de-precessao-da-terra.html>> Acesso em: 01 nov 2015

LEVRARD, B.; LASKAR, J. Climate friction and the Earth's obliquity **Geophys. J. Int.** 154, 970–990, 2003. Disponível em <<http://gji.oxfordjournals.org>> Acesso em: 21 mai, 2015.

MAENZA, R. A., COMPAGNUCCI, R. H. Simulación de la pequeña edad de hielo usando el modelo EdGCM. **Geoacta**, v. 35, p. 78-91, 2010.

MESQUITA, A. A. 2010. A dinâmica da radiação solar e os principais aspectos do balanço energético global. Disponível em <http://www.webartigos.com/artigos/a-dinamica-da-radiacao-solar-e-os-principais-aspectos-do-balanco-energeticoglobal/53898/#ixzz3qMUjTVwo> Acesso em: 01 nov 2015.

REBOITA, M. S.; PIMENTA, A. P.; NATIVIDADE, U. A. Influência da inclinação do eixo de rotação da Terra na temperatura do ar global, 2015. Em revisão na TerraE Didática.

RIVERA, P. C.; KHAN, T. M. A. Discovery of the Major Mechanism of Global Warming and Climate Change. **Journal of Basic & Applied Sciences**, v. 8, p. 59-73, 2012.

RUDDIMAN, W.F. Earth's Climate: Past and Future. NY: W. H. Freeman, 2008. 388 pp.

SILVA, J. G. R. 2007. Ciclos orbitais ou ciclos de Milankovitch. Textos de Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em <<http://www.unb.br/ig/glossario/>> Acesso em: 05 jun. 2015.

SILVA R. W. C.; Paula B. L. Causa do aquecimento global: antropogênica versus natural. **Terræ Didática**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009. Disponível em <

[http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD\\_V-a4.pdf](http://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD_V-a4.pdf)> Acesso em: 05 jun. 2015.

The Basic Guide to EdGCM, Columbia University, 2003.

VERSTEGEN T.; SCHULTZ, R. Snowball Earth. Disponível em <<http://www.midwestweather.org/p/snowball-earth.html>> Acesso em: 26 set. 2015.

WASKO, C.; SHARMA, A. Effect of solar variability on atmospheric moisture storage. *Geophysical research letters*, v.36, 2009, DOI:10.1029/2008GL036310.

WILLIAMS, D.M., POLLARD D. 2003. Extraordinary climates of Earth-like planets: three-dimensional climate simulations at extreme obliquity. *International Journal of Astrobiology*, 2: 1–19.