



ANÁLISE DO AQUECIMENTO GLOBAL ATRAVÉS DE UMA PERSPECTIVA
DINÂMICA

Flavio Maggesi Viola

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Rio de Janeiro

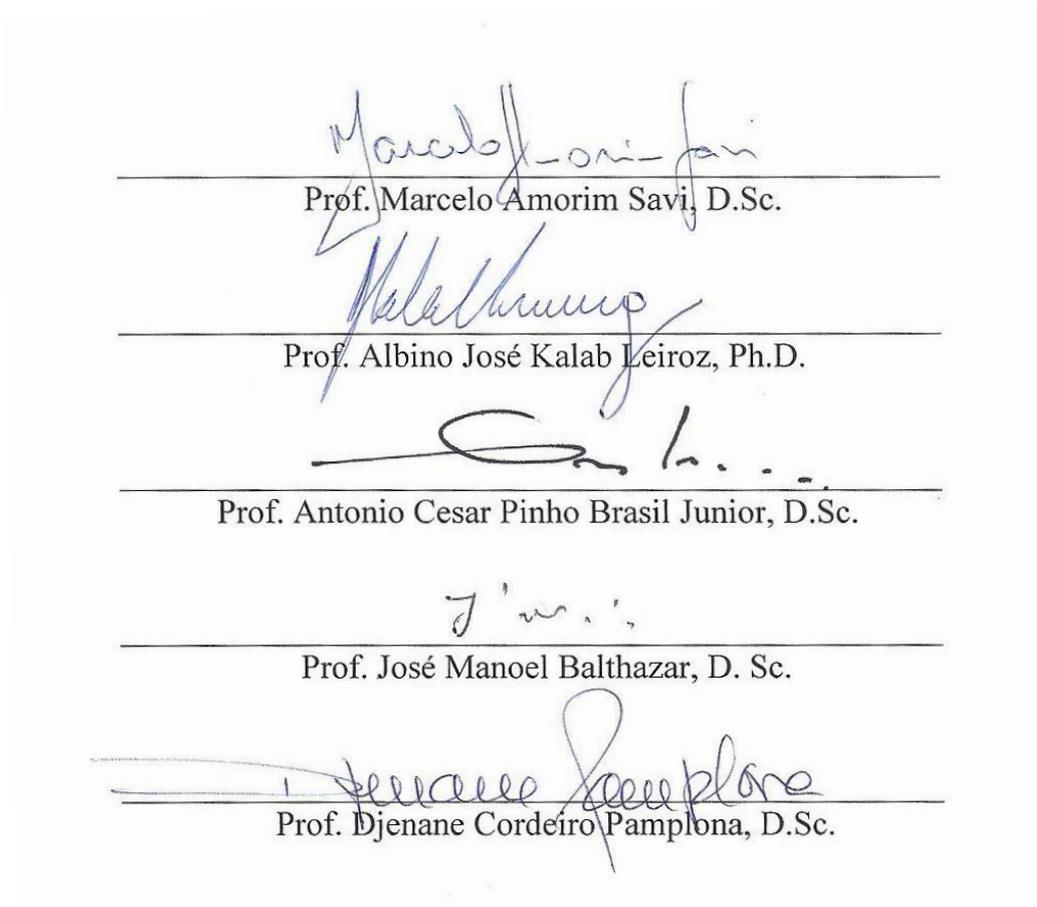
Abril de 2011

ANÁLISE DO AQUECIMENTO GLOBAL ATRAVÉS DE UMA PERSPECTIVA
DINÂMICA

Flavio Maggesi Viola

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:



RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2011

Viola, Flavio Maggessi

Análise do Aquecimento Global Através de uma
Perspectiva Dinâmica / Flavio Maggessi Viola. – Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XVIII, 86 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Mecânica, 2011.

Referencias Bibliográficas: p. 79-86.

1. Dinâmica Não-linear. 2. Aquecimento Global. 3.
Séries Temporais. 4. Modelo *Daisyworld* (Planeta das
Margaridas). 5. Caos. I. Savi, Marcelo Amorim. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

Para Rose, João Pedro e Felipe.

E para minha mãe e meu pai pela educação
que me deram.

Agradecimentos

À minha família, em especial a Rose, João Pedro e Felipe, pelo incentivo e pela compreensão nas horas que deixei de aproveitar com eles durante este trabalho e ao meu sogro (José Mariano Galante) e minha sogra (Odília Conceição Neves Galante) por estarem sempre presentes e não medirem esforços para nos ajudar;

Ao meu amigo, orientador, professor Marcelo Amorim Savi, pelas orientações e ensinamentos, no trabalho e na vida, pela capacidade de conduzir o trabalho e acima de tudo pela confiança de que eu teria condições de concluí-lo;

As “margaridas” Susana e Suelen, pela fundamental participação no desenvolvimento deste trabalho;

Aos companheiros do LAVI e da família FENÃO: Alberto, Bianca, Jefferson, Mariana, Marina, Rafael, Sandra, Vanderson, Vandrê e a todos que não foram citados, mas contribuíram de alguma maneira para o desenvolvimento do trabalho;

À Aline Souza de Paula, pela amizade e por sempre estar disposta a ensinar, tirar dúvidas e ajudar no que for preciso. E também ao Heitor pelos risotos e tapiocas nas hospedagens em Brasília.

Ao amigo Sérgio de Almeida Oliveira, pelo companheirismo no dia a dia e nas viagens;

Ao professor Antonio Brasil (UNB), por indicar as primeiras referências do *Daisyworld*;

Aos professores e funcionários do programa de Engenharia mecânica, que de alguma forma também colaboraram com este trabalho;

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

E a essa força que chamam de DEUS, que me mantém em constante equilíbrio espiritual.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ANÁLISE DO AQUECIMENTO GLOBAL ATRAVÉS DE UMA PERSPECTIVA
DINÂMICA

Flavio Maggessi Viola

Abril/2011

Orientador: Marcelo Amorim Savi

Programa: Engenharia Mecânica

Este trabalho investiga o fenômeno do aquecimento global através de uma perspectiva dinâmica considerando duas abordagens. A primeira é a análise de séries temporais de temperatura, através de ferramentas não-lineares utilizando técnicas robustas não sensíveis a ruídos. O Método das Coordenadas Defasadas é empregado para a reconstrução do espaço de estado. Os parâmetros de defasagem são avaliados pelo Método da Informação Mútua Média e o Método de Falsos Vizinhos Próximos. Posteriormente, uma predição não-linear simples é empregada para estimar temperaturas futuras. Séries temporais de temperatura de diferentes localidades do planeta são usadas. Inicialmente, a abordagem é verificada considerando partes conhecidas da série temporal e, posteriormente, os resultados são extrapolados para os valores futuros. A segunda abordagem refere-se à modelagem matemática do aquecimento global. A formulação matemática é baseada no modelo *Daisyworld* que mostra que a regulação global pode emergir a partir da interação entre a vida e o ambiente. A vida é representada por populações de margaridas enquanto o ambiente é representado pela temperatura. Uma variável adicional relacionada aos gases de efeito estufa é incorporada ao modelo, possibilitando a análise do aquecimento global. Além disso, considera-se a evolução do transiente de temperatura. A variabilidade climática é tratada considerando uma variação senoidal da luminosidade solar. Atenção especial é dedicada ao comportamento caótico do sistema. De uma maneira geral, a análise de séries temporais e o modelo do *Daisyworld* permitem uma análise qualitativa do fenômeno do aquecimento global.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

GLOBAL WARMING ANALISYS FROM DYNAMICAL PERSPECTIVE

Flavio Maggesi Viola

April/2011

Advisor: Marcelo Amorim Savi

Department: Mechanical Engineering

This work investigates the global warming phenomenon from a dynamical perspective using two approaches. The first one is the time series analysis using nonlinear tools with robust techniques. The method of delay coordinates is employed for state space reconstruction and delay parameters are evaluated using the Method of Average Mutual Information and the Method of False Nearest Neighbors. Afterwards, the simple nonlinear prediction method is employed to estimate temperatures of the future. Temperature time series from different places of the planet are used. Initially, the approach is verified considering known parts of the time series and then, results are extrapolated for future values. The second approach refers to the mathematical modeling of the global warming. Mathematical formulation is based on the Daisyworld model that is able to represent the global regulation that can emerge from the interaction between life and environment. Daisyworld represents life by daisy populations while the environment is represented by temperature. An extra variable related to greenhouse gases is incorporated in the model allowing the analysis of the global warming. Moreover, temperature evolution transient is of concern. Climate variability is treated by considering a sinusoidal variation of the solar luminosity. Special attention is dedicated to chaotic behavior. In general, time series analysis and Daisyworld model allow a qualitative description of the global warming phenomenon.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIGLAS.....	XV
LISTA DE SÍMBOLOS	XVI
1	INTRODUÇÃO..... 1
1.1	Organização do Trabalho..... 11
2	ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS..... 13
2.1	Técnicas Não-lineares..... 14
2.2	Método da Informação Mútua Média..... 15
2.3	Método dos Falsos Vizinhos Próximos 16
2.4	Predição 18
2.5	Fonte das Séries de Temperatura e CO ₂ 19
2.6	Resultados da Análise de Séries Temporais 23
2.7	Verificação do Modelo 25
2.8	Predição Futura..... 38
3	MODELO DAISYWORLD 43
3.1	Modelo Matemático..... 45
3.2	Daisyworld Clássico 50
3.3	Daisyworld com Gases Estufa..... 55
3.4	Daisyworld com Variabilidade Climática 60
4	CONCLUSÕES..... 75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mecanismo de aquecimento da Terra.	2
Figura 1.2: Concentração média anual de dióxido de carbono (CO ₂) na atmosfera, de 1980 à 2010 (NOAA, 2011).	3
Figura 1.3: Temperatura média anual da terra de 1880 à 2010 (NASA, 2009, 2011).....	4
Figura 1.4: Visão esquemática do sistema climático (IPCC, 1997 e 2001).	5
Figura 2.1: Esquema da análise de séries temporais.	15
Figura 2.2: Esquema representando o método dos falsos vizinhos com $D = 1, 2$ e 3	17
Figura 2.3: Predição de séries temporais.	18
Figura 2.4: Estações meteorológicas. Imagem adaptada de Worldlog, 2009.....	20
Figura 2.5: Séries temporais de temperatura (linha preta) e regressão linear (linha vermelha).	22
Figura 2.6: Séries temporais analisadas (linha sólida azul) e suas predições (linha tracejada vermelha).....	24
Figura 2.7: Pequim (China) – parâmetros de defasagem para série temporal - 10 anos (1989 to 1998).....	26
Figura 2.8: Pequim (China) - predição. (a) Comparação entre a série temporal (linha preta) e a predição (linha vermelha), de 1999 a 2008. (b) Histograma com erros entre a predição e a série de temperatura.	26
Figura 2.9: Pequim (China) – parâmetros de defasagem para série temporal - 24 anos (1976 a 1999).....	27
Figura 2.10: Pequim (China) - predição. (a) Comparação entre a série temporal (linha preta) e a predição (linha vermelha), de 2000 a 2008. (b) Histograma com erros entre a predição e a série de temperatura.	28
Figura 2.11: Pequim (China), Comparação entre a série temporal original (linha preta) e a série filtrada (linha vermelha), de 1999 a 2008.	29
Figura 2.12: Pequim (China) – predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	29
Figura 2.13: Montreal (Canadá) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	31

Figura 2.14: Los Angeles (EUA) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	32
Figura 2.15: Rio de Janeiro (Brasil) – predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	33
Figura 2.16: Londres (Reino Unido) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	34
Figura 2.17: Johannesburgo (África do Sul) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.....	35
Figura 2.18: Tóquio (Japão) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	36
Figura 2.19: Albany (Austrália) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.	37
Figura 2.20: Análise dos erros diários de predição.	38
Figura 2.21: Resultados da predição.	40
Figura 2.22: Predição de 2009 a 2028 e tendência linear de crescimento.....	41
Figura 3.1: Taxa de crescimento das margaridas em função da temperatura.....	49
Figura 3.2: Resposta do <i>Daisyworld</i> com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 0$. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).	51
Figura 3.3: Resposta do <i>Daisyworld</i> com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 300 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).	51
Figura 3.4: Resposta do <i>Daisyworld</i> com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 1000 \text{ J/m}^2\text{Ks}$. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).	52
Figura 3.5: Resposta do <i>Daisyworld</i> com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).	52

Figura 3.6: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=0$.	53
Figura 3.7: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=300 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).	54
Figura 3.8: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=1000 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).	54
Figura 3.9: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).	55
Figura 3.10: (a) Média anual das emissões de CO_2 e (b) valores utilizados para G .	56
Figura 3.11: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 0$.	57
Figura 3.12: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 300 \text{ J/m}^2\text{K s}$.	57
Figura 3.13: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 1000 \text{ J/m}^2\text{K s}$.	58
Figura 3.14: Resposta do <i>Daisyworld</i> com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$.	58
Figura 3.15: Evolução da população de margaridas (esquerda) e da temperatura (direita) com variação nas emissões dos gases estufa, considerando luminosidade constante (a,b) e crescimento linear da luminosidade (c,d).	59
Figura 3.16: Luminosidade linear (linha escura) e variação senoidal (linha clara).	60
Figura 3.17: Evolução da temperatura com a luminosidade solar crescendo linearmente. $L_0=0,1$ e $\omega=0,01$ (linha escura), $L_0=0,0$ e $\omega=0,0$ (linha clara). (a) $G = 0$ (b) com gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$).	61
Figura 3.18: Evolução das populações de margaridas com a luminosidade solar crescendo linearmente. (a) $L_0=0,0$, $\omega=0,0$ e $G=0$; (b) $L_0=0,0$, $\omega=0,0$ e ($0,0 \leq G \leq 0,8$).	61
Figura 3.19: Evolução das populações de margaridas com a luminosidade solar crescendo linearmente. (a) $L_0=0,1$, $\omega=0,01$ e $G=0$; (b) $L_0=0,1$, $\omega=0,01$ e ($0,0 \leq G \leq 0,8$).	62

Figura 3.20: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,20$) com $\omega = 0,01$	63
Figura 3.21: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $\omega=0,05$ e (b) $\omega=0,1$	63
Figura 3.22: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $L_0=0,05$, e (b) $L_0=2,0$	64
Figura 3.23: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $G=0,31$ e (b) $G=0,46$	64
Figura 3.24: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} . (a) $0,75 \leq \bar{L} \leq 0,80$; (b) $0,87 \leq \bar{L} \leq 0,94$ e (c) $1,00 \leq \bar{L} \leq 1,07$	65
Figura 3.25: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,76$	66
Figura 3.26: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,7629$	66
Figura 3.27: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,7787$	67
Figura 3.28: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,78$	67
Figura 3.29: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,782$	68
Figura 3.30: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,88$	68
Figura 3.31: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,90$	68
Figura 3.32: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,9082$	69
Figura 3.33: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,9097$	69
Figura 3.34: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,919$	70
Figura 3.35: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,9238$	70
Figura 3.36: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=1,01$	71
Figura 3.37: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=1,02$	71
Figura 3.38: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=1,04$	71

Figura 3.39: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=1,05$	72
Figura 3.40: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.27.	73
Figura 3.41: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.35.	74
Figura 3.42: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.39.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Origem dos dados (NOAA, 2009).	21
---	----

Tabela 2.2: Resumo do procedimento de verificação.....	38
Tabela 2.3: Análise dos parâmetros de defasagem.....	39
Tabela 2.4: Resultados da predição e tendência linear de crescimento de 2009 a 2028.	40

LISTA DE SIGLAS

ARIMA	- <i>Autoregressive integrated moving average</i> (modelo auto-regressivo integrado de média móvel)
ARMA	- <i>Autoregressive moving average</i> (modelo auto-regressivo média móvel)
CH ₄	- Metano
CO ₂	- Dióxido de carbono
DFA	- <i>Detrended Fluctuation Analysis</i> (Análise de flutuações sem tendência)
EUA	- Estados Unidos da América
FNN	- <i>False Nearest Neighbors</i> (Falsos Vizinhos Próximos)
GCMs	- <i>Global Circulation models</i> (modelos de circulação geral)
IPCC	- <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
MBMs	- <i>Model-based methods or empirical models</i> (métodos baseados em modelos ou métodos empíricos)
N ₂ O	- Óxido nitroso
NOAA	- <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OMM	- Organização Meteorológica Mundial
PDMs	- <i>Planet's dynamics models</i> (modelos da dinâmica planetária)
RCMs	- <i>Regional climate models</i> (modelos climáticos regionais)
STARMA	- <i>Space-time autoregressive moving average</i> (modelo espaço temporal auto-regressivo média móvel)
TISEAN	- <i>Nonlinear Time Series Analysis</i> (análise não-linear de séries temporais)
TSA	- <i>Time series analysis</i> (análise de series temporais)
UNFCCC	- <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas)
USAF	- Número da estação na base de dados <i>Air Force Datsav3</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

S_n	Série temporal escalar.
$S_{n+\tau}$	Série temporal escalar defasada de τ .
τ	Tempo de defasagem.
D_e	Dimensão de imersão.
$U(t)$	Espaço de estado reconstruído.
$I(\tau)$	Informação mútua média.
$I(S_n)$	Probabilidade da medida S_n .
$I(S_{n+\tau})$	Probabilidade da medida $S_{n+\tau}$.
$I(S_n, S_{n+\tau})$	Probabilidade da medida combinada de S_n e $S_{n+\tau}$.
$r_D^2(n, r)$	Distâncias Euclidianas entre $u(t)$ e $u^{(r)}(t)$ - r -ésimos vizinhos próximos.
$S_{n+k\tau}$	Nova coordenada quando aumenta a dimensão D .
$S_{n+k\tau}^r$	Nova coordenada dos r -ésimos vizinhos próximos quando aumenta a dimensão D .
S_{n+p}	Valores futuros da série temporal escalar.
P_n	Série futura estimada.
$P_{N+\Delta n}$	Predição no instante Δn .
$V_\varepsilon(U_N)$	Vizinhança em torno do ponto U_N .
ε	Parâmetro do tamanho da vizinhança.
$ V_\varepsilon(U_N) $	Número de elementos da vizinhança $V_\varepsilon(U_N)$.
y_n	Filtro média móvel.
m	Fator em dias do filtro média móvel.
\bar{E}	Erro médio da predição.
\bar{S}	Média da série temporal.
\bar{P}	Média da predição.

E_n^D	Erro diário da predição.
S_n^D	Valor da série temporal em determinado dia.
P_n^D	Valor da predição em determinado dia.
T_{max}	Temperatura máxima da série temporal.
T_{min}	Temperatura mínima da série temporal.
α_i	Área coberta pela população de margaridas.
$\dot{\alpha}_i$	Derivada no tempo da população de margaridas.
I	Identificação do tipo de margarida (branca ou preta).
α_g	Fração de área descoberta do planeta.
$\beta(T_i)$	Função que determina a taxa de crescimento das margaridas.
T_i	Temperatura local das margaridas.
T_g	Temperatura local da área descoberta do planeta.
T_G	Temperatura local dos gases estufa.
γ	Taxa de mortalidade.
G	Gases de efeito estufa.
$G(t)$	Função que estabelece o histórico de gases de efeito estufa.
P	Proporção de área disponível para crescimento das margaridas.
N	Número de populações de margaridas.
A	Albedo médio do planeta <i>Daisyworld</i> .
a_g	Albedo da terra descoberta do planeta.
a_i	Albedo das margaridas.
a_G	Albedo dos gases de efeito estufa.
T	Temperatura média global do <i>Daisyworld</i> .
Q	Medida do grau de isolamento entre as regiões da superfície do planeta.
S	Constante solar.

L	Luminosidade solar.
C	Capacidade térmica ou inércia térmica do planeta.
σ	Constante de <i>Stefan-Boltzmann</i> .
\dot{T}	Derivada da temperatura no tempo.
$\bar{L} = \bar{L}(t)$	Crescimento linear da luminosidade.
L_0	Forçamento da luminosidade.
ω	Frequência de forçamento.
T_{opt}	Temperatura ótima, onde ocorre a maior taxa de crescimento.
K	Tamanho da parábola que indica a taxa de crescimento.
B	Parâmetro para representar características ambientais.
λ	Expoente de <i>Lyapunov</i> .

1 INTRODUÇÃO

O planeta Terra possui um mecanismo de aquecimento natural no qual sua temperatura se mantém dentro de limites confortáveis para a vida. Esse mecanismo de aquecimento está relacionado com o balanço de energia, no qual os principais aspectos são a radiação de energia do sol para a Terra e a radiação térmica da Terra para o espaço, conforme o esquema da Figura 1.1 (Foong, 2006).

A atmosfera executa um papel essencial neste processo retendo parte dessa radiação. Os chamados gases do efeito estufa ou gases estufa, naturais e antropogênicos (derivados de atividades humanas), são os gases constituintes da atmosfera responsáveis pela retenção dessa radiação. Assim sendo, o efeito estufa representa um processo natural onde gases provenientes de processos físicos, químicos e biológicos retêm uma porção da radiação solar na atmosfera terrestre, mantendo a temperatura média global em valores favoráveis à existência de vida.

Ações humanas têm alterado o equilíbrio desse sistema acrescentando à atmosfera gases estufa em quantidades e taxas excessivas, afetando o equilíbrio do sistema, uma vez que esses gases são transparentes para a radiação de ondas curtas (ultravioleta) emitidas pelo sol e absorvem as ondas longas (infravermelho) emitidas pela Terra. Portanto o aumento desses gases provoca um aumento na temperatura média da superfície da Terra e dos oceanos, gerando o que se entende por aquecimento global.

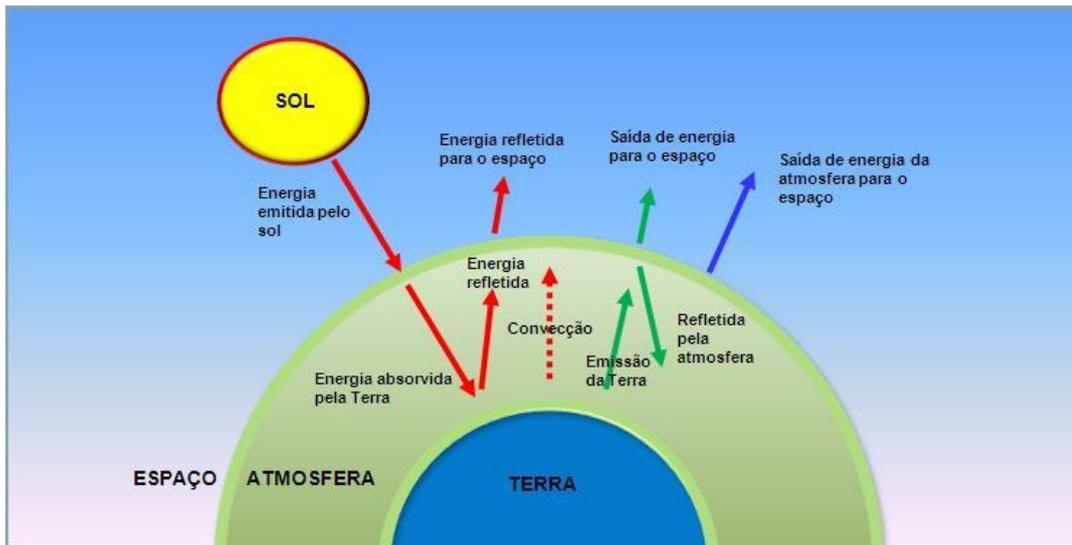


Figura 1.1: Mecanismo de aquecimento da Terra.

O aquecimento global é uma denominação específica de um caso mais geral chamado de mudanças climáticas. Esse fenômeno pode ser induzido por processos naturais ou por atividades humanas e suas consequências ainda não são completamente conhecidas. De forma resumida, o aquecimento global é observado em função do aumento médio da temperatura da atmosfera da Terra e dos oceanos. A principal causa desse fenômeno é a liberação de gases estufa decorrente da queima de combustíveis fósseis e desmatamento em larga escala. Dentre os gases estufa, merecem destaque: vapor d'água, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (Houghton, 2005).

Desde a revolução industrial, a quantidade de gases estufa na atmosfera tem aumentado significativamente. Com base nos dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), as emissões globais de gases de efeito estufa, devido às atividades humanas, tiveram um aumento de 70% entre 1970 e 2004 com destaque para o dióxido de carbono (CO_2) cujas emissões anuais cresceram em cerca de 80% (21-38 gigatoneladas) neste período. Com isso, ocorre também um aumento da concentração deste gás na atmosfera da Terra, como pode ser observado na Figura 1.2. Observa-se a forte tendência de crescimento dessas concentrações.

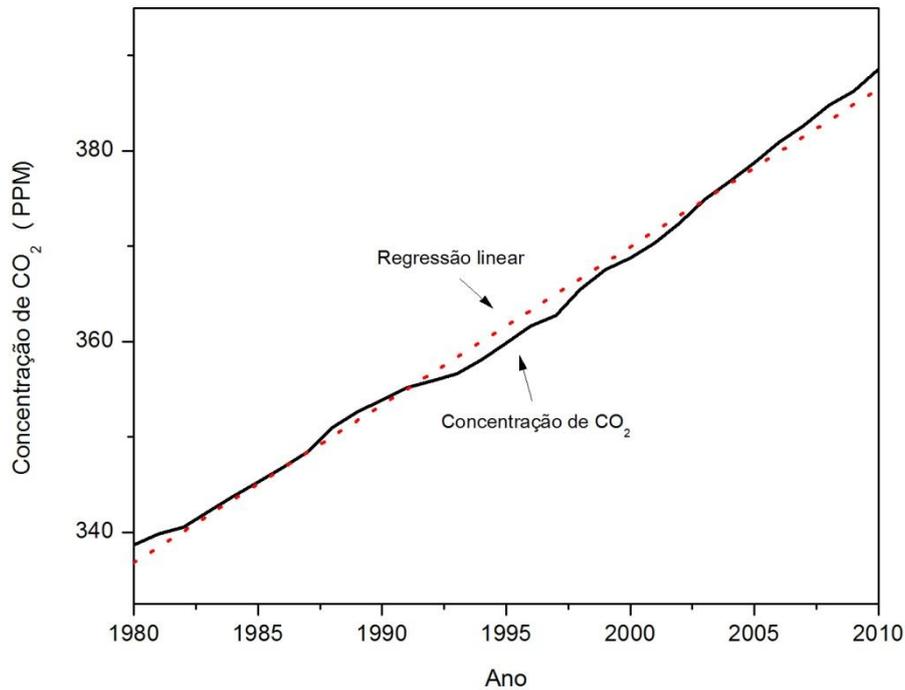


Figura 1.2: Concentração média anual de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, de 1980 à 2010 (NOAA, 2011).

Durante o século XX, a temperatura média global da superfície da Terra apresentou uma tendência linear de crescimento de aproximadamente 0,6°C (IPCC, 2007). Observando a Figura 1.3 pode-se perceber essa tendência de crescimento. Analisando mais detalhadamente o gráfico da Figura 1.3, é possível identificar períodos onde ocorrem tendências maiores de crescimento, por exemplo, entre os períodos: de 1910 a 1945 e a partir da metade dos anos 70 até os dias hoje. E outros onde não há uma tendência de crescimento, por exemplo, no período a partir da metade da década de 40 e o início dos anos 70. Ao analisar apenas as três últimas décadas (1980-2010) este é o período em que ocorre a maior tendência linear de crescimento da temperatura. Este comportamento das tendências da temperatura pode ser associado às emissões e às concentrações de gases estufa, que por sua vez, podem ser relacionados com as atividades econômicas (períodos de crescimento e de recessão) e fatos históricos ocorridos no século XX.

As conseqüências do aquecimento global são imprevisíveis, no entanto, pode-se mencionar a sensibilidade do clima e outras mudanças relacionadas à frequência e intensidade de eventos meteorológicos extremos.

Como dito anteriormente, o aquecimento global é um fenômeno climático provocado pelo aumento da temperatura média do planeta. Esse aumento pode ser constatado analisando as medições de temperatura, ao longo dos anos, em estações climáticas distribuídas por diversas regiões do planeta. A Figura 1.3 apresenta a evolução da temperatura média da Terra de 1880 a 2010 (NOAA, 2009, 2011). Pode-se observar a tendência de crescimento da temperatura neste período.

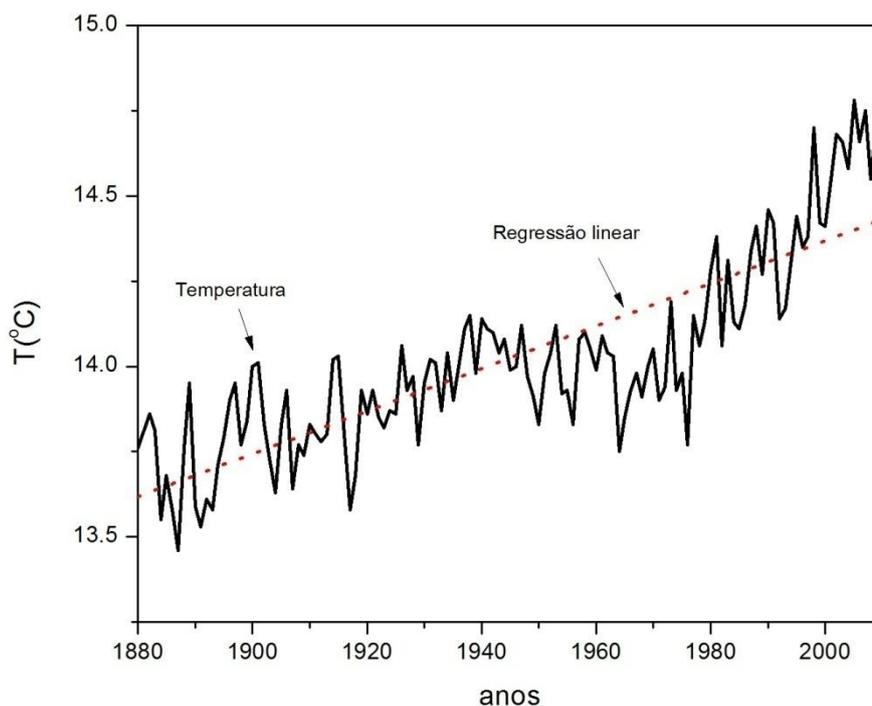


Figura 1.3: Temperatura média anual da Terra de 1880 à 2010 (NASA, 2009, 2011).

O sistema climático tem uma complexidade intrínseca devido aos diferentes tipos de fenômenos envolvidos. O equilíbrio desse sistema é uma consequência de diferentes aspectos relacionados com a atmosfera, os oceanos, a biosfera e muitos outros, e a atividade solar que

fornece a força motriz do sistema. A presença dos gases de efeito estufa tende a romper o equilíbrio térmico desse sistema, aumentando a temperatura média da Terra. A Figura 1.4 apresenta uma visão esquemática do sistema climático da Terra, mostrando algumas interações entre os diferentes aspectos mencionados (IPCC, 1997).

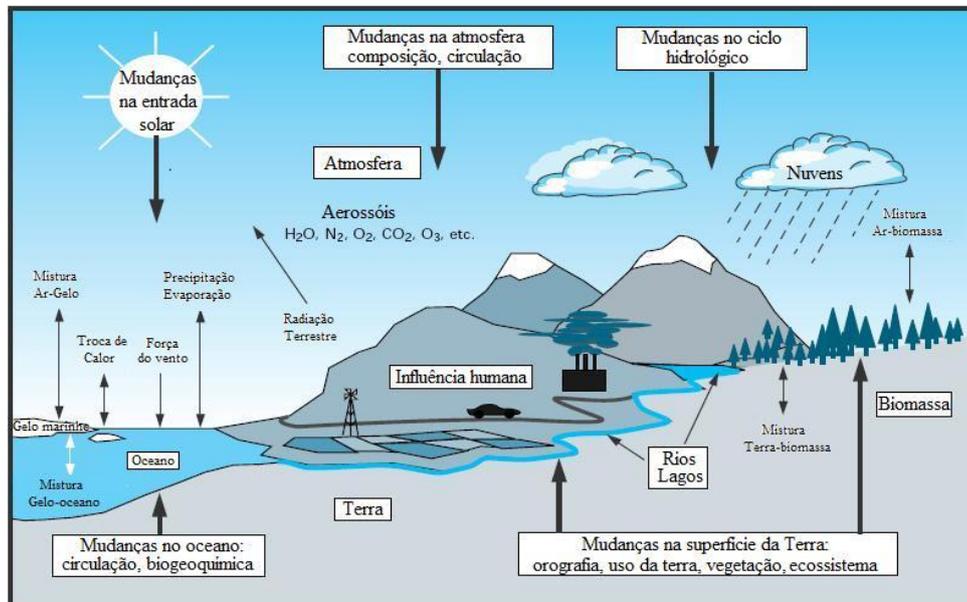


Figura 1.4: Visão esquemática do sistema climático (IPCC, 1997 e 2001).

Várias mudanças climáticas estão ocorrendo e são creditadas ao aquecimento global. Essas mudanças tornam-se cada vez mais perceptíveis, tais como: derretimento das geleiras e das calotas polares, aumento do nível dos mares, formação de tornados em regiões onde ainda não haviam ocorrido, inversões climáticas, maior incidência de fenômenos climáticos (furacões, secas, chuvas torrenciais e desertificação) dentre outros. Mas nem todas essas mudanças devem ser diretamente associadas ao aquecimento global.

Uma observação sobre o sistema climático permite identificar dois fenômenos distintos relacionados com a evolução do sistema: a mudança climática e a variabilidade climática. Portanto, sobre esse aspecto é importante estabelecer uma diferença entre esses fenômenos. A mudança climática geralmente está relacionada às atividades humanas (processos

antropogênicos) e associada a mudanças permanentes, enquanto a variabilidade climática, geralmente está associada a causas naturais (UNFCCC, 1992).

A variabilidade climática pode ser entendida como desvios das condições climáticas ao longo de um período de tempo, devido aos fenômenos naturais, sem causar alterações definitivas (WMO, 2010). Como exemplos de variabilidade climática têm-se: a *IPO - Interdecadal Pacific Oscillation*, que provoca mudanças nas médias climáticas; o *El Niño-La Niña Oscilação Sul (ENSO - El Niño-La Niña Southern Oscillation)*, que provoca grande variabilidade nas regiões tropicais e subtropicais; *Oscilação do Atlântico Norte (NAO - North Atlantic Oscillation)*, que gera perturbações climáticas na Europa e no Norte da África (Salinger, 2005).

Uma boa definição para mudança climática é apresentada em UNFCCC (1992): "*a mudança de clima que é atribuída direta ou indiretamente a atividades humanas que alteram a composição da atmosfera global e que está além da variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis*".

Estabelecendo uma comparação entre as Figuras 1.2 e 1.3, observa-se que há uma relação direta entre as concentrações de CO₂ e o aumento médio da temperatura da Terra. Portanto através da análise do comportamento dessas variáveis (emissão e concentração de gases estufa e temperatura) é possível gerar projeções futuras em relação ao aquecimento global. Essas projeções podem ser realizadas através da aplicação de técnicas de análise de séries temporais e da utilização de modelos matemáticos.

Diferentes técnicas e abordagens são estudadas e aplicadas para tratar o problema do aquecimento global e das mudanças climáticas. Até o momento, não existe um modelo matemático consagrado para representar o sistema climático no que se refere ao aquecimento global.

A análise das mudanças climáticas é importante para definir diferentes cenários, cujo conhecimento se aplica a diversas finalidades. Da mesma forma, a análise do aquecimento global

é importante para estabelecer modelos que possam prever a evolução de gases de efeito estufa e da temperatura da Terra. Além disso, é de fundamental importância avaliar as consequências dos efeitos dessas variações no equilíbrio mundial e na vida. A literatura apresenta vários esforços para lidar com este tipo de análise.

Em relação à modelagem matemática é possível estabelecer a seguinte classificação: modelos de circulação geral (*GCMs - general circulation models*); métodos baseados em modelos ou métodos empíricos (*MBMs - model-based methods or empirical models*); modelos da dinâmica planetária (*PDMs - planet's dynamics models*) (Alexiadis, 2007). Além disso, pode-se destacar a existência de modelos construídos a partir da análise de séries temporais (*TSA - time series analysis*) (Viola *et al.*, 2010). Considerando sistemas dinâmicos de modo mais abrangente, é possível apresentar uma classificação diferente, mas que está de acordo com a classificação anterior (Aguirre, 2007; Aguirre & Lettelier, 2009) que são: modelos caixa branca, baseados em argumentos físicos; modelos caixa preta, baseados em séries temporais e modelos caixa cinza que combina as duas idéias.

Os *GCMs* consideram os aspectos físicos da dinâmica do sistema, incluindo, por exemplo, a conservação de massa, energia e momentum. Uma das características mais importantes deste tipo de modelagem é o esforço computacional relacionado com as simulações, necessitando de computadores com grande capacidade de processamento e armazenamento (super computadores) (Friedlingstein *et al.*, 2003; Cox *et al.*, 2000; Joos *et al.*, 2001). Uma visão geral dos modelos baseados em princípios físicos é apresentada em Houghton (2005).

Uma abordagem alternativa baseada em *GCMs* são os modelos climáticos regionais (*RCMs - regional climate models*) (Alpert *et al.*, 2008; Kueppers *et al.*, 2008). Entre outras abordagens alternativas destacam-se os modelos que tentam reduzir as incertezas baseados em considerações estatísticas (Ghila *et al.*, 2008; Lopez *et al.*, 2006).

Os *MBMs* não tratam diretamente aspectos físicos do sistema, e sim utilizam observações empíricas ou ferramentas estatísticas a partir de séries temporais experimentais (Kaufmann & Stern, 1997; Loehle, 2004; Krivova & Solanki, 2004). Stringham *et al.* (2003) apresentou uma revisão de modelos conceituais enfatizando as inconsistências na aplicação dos conceitos de não-equilíbrio em ecologia. Young & Ratto (2009) propuseram uma abordagem unificada para a modelagem de sistemas ambientais, considerando as informações da análise de dados reais. A idéia foi conectar as abordagens dos *MBMs* a dos *GCMs*.

Os *PDMs* são modelos baseados em uma descrição simplificada da dinâmica do sistema e recaem entre as duas categorias anteriores (Moore, 2007; Kay *et al.*, 2009). O modelo *Daisyworld*, originalmente proposto por Lovelock (1992), é um protótipo deste tipo de abordagem. O *Daisyworld* é um arquétipo da Terra com capacidade para descrever a regulação global do planeta a partir da interação entre a vida e o ambiente, sendo a vida representada por uma população de margaridas enquanto o ambiente é representado pela temperatura (Lenton & Lovelock, 2000, 2001).

Por fim, a análise de séries temporais, tenta construir um modelo a partir de dados experimentais. Alexiadis (2007) considera a análise de séries temporais com base na teoria de controle, utilizando técnicas de identificação de sistema para determinar as funções de transferência que se aproximam da dinâmica do sistema. Qin *et al.* (2008) aplicaram a técnica da “transformada de *wavelet* contínua” para analisar os fluxos de vapor de água e dióxido de carbono em solos agrícolas e investigar potenciais de aquecimento global. Capilla (2008) empregou um ajuste de regressão polinomial local e métodos de suavização por *wavelet*, a fim de identificar tendências locais na temperatura na área urbana do Mediterrâneo. Rybski & Bunde (2009) empregou o método *DFA* (*detrended fluctuation analysis*), ou seja, a análise de flutuações sem tendências, para quantificar a correlação de longo prazo entre registros de séries temporais.

Séries temporais de temperatura são motivos de grande interesse de estudo e diferentes ferramentas são usadas para analisá-las.

Subba & Antunes (2003) apresentou uma revisão dos modelos *STARMA* (*space-time autoregressive moving average*), modelo espaço-temporal auto-regressivo média móvel. O desempenho previsto pelo modelo *STARMA* é comparado com o modelo *ARMA* (*autoregressive moving average*), usando dados reais. Mais tarde, Antunes & Subba (2006) propuseram testes estatísticos comparando processos espaço-temporais auto-regressivos e processos auto-regressivos multivariados. Koçak *et al.* (2004), aplicaram técnicas não-lineares para predição de séries temporais utilizando uma aproximação polinomial. Romilly (2005) utilizou o modelo *ARIMA* (*autoregressive integrated moving average*), modelo auto-regressivo integrado de média móvel, juntamente com desenvolvimentos mais recentes para analisar conjunto de dados de temperatura média global. Founda *et al.* (2004) aplicou métodos estatísticos para séries temporais de temperatura observando tendências e eventos extremos nas estações de Atenas, Grécia, dentre 1987 e 2001. Grieser *et al.* (2002) usaram métodos estatísticos para decompor as séries temporais de temperatura em uma soma de tendência, ciclos anuais, componentes episódico e harmônico, os eventos extremos e ruídos. A literatura também apresenta esforços relacionados a vários aspectos de modelagem ecológica. Entre outros, pode-se citar Urban (2005) que discutiu os aspectos multi-escala relacionados à modelagem de sistemas ecológicos. Kettleborough *et al.* (2007) descreveram um método para estimar as incertezas nas mudanças da temperatura média global. Jacob & Winner (2009) descreveram o impacto da mudança climática sobre qualidade do ar.

Este trabalho desenvolve uma análise do aquecimento global através de uma perspectiva dinâmica. Para isso, duas linhas de estudo são propostas para abordar o problema: análise de séries temporais associadas a temperatura média do planeta; e modelos matemáticos associados a dinâmica das populações (fator biótico) e do meio ambiente (fator abiótico) em que elas vivem.

A primeira abordagem pretende desenvolver uma análise do aquecimento global através de séries temporais da temperatura média da Terra. O estudo considera séries temporais de diferentes localizações do planeta tentando estabelecer uma relação de aspectos espaço-temporais. A contribuição central desta fase do trabalho é a utilização de técnicas de análise de séries não-lineares (Kantz & Schreiber, 1997; Savi, 2006) como a reconstrução do espaço de estado e a predição de valores futuros (Viola *et al.*, 2010). Os resultados se mostraram coerentes com a literatura, o que é uma indicação de que essas ferramentas possam ser utilizadas para tratar o fenômeno do aquecimento global. Essas técnicas, embora consagradas e bastante abordadas na literatura, são utilizadas pela primeira vez no que se refere ao sistema climático, neste trabalho.

Outra contribuição deste trabalho é tratar a modelagem do aquecimento global a partir de modelos matemáticos. A modelagem de fenômenos biológicos e ecológicos vem tendo importantes crescimentos nos últimos anos (Savi, 2005, 2006). Esses modelos descrevem a evolução temporal e a distribuição espacial dos sistemas e podem explicar algumas importantes características desses sistemas. A análise matemática explora a possibilidade de que muitos desses fenômenos tenham suas raízes em algum efeito dinâmico fundamental. Embora existam muitas dificuldades relacionadas à descrição do sistema, sua modelagem pode definir ao menos uma caricatura do sistema, que pode ser útil para diferentes objetivos.

Este trabalho considera o modelo *Daisyworld*, onde são propostas alterações em relação ao modelo original: incorporação de uma nova variável para representar os gases estufa, permitindo a análise do aquecimento global (Viola *et al.*, 2009); análise da evolução de transientes de temperatura; descrição da variabilidade climática a partir da inclusão de uma variação senoidal da luminosidade solar. Essas modificações no modelo geram alterações significativas na sua dinâmica. Com isso, os resultados apresentam um padrão irregular, estando associada com a riqueza de respostas que incluem comportamentos periódicos, quasi-periódicos e caóticos. Destacando que esta riqueza de comportamentos ainda não havia sido encontrada no

modelo *Daisyworld*. Simulações numéricas são realizadas a fim de apresentar uma descrição qualitativa do fenômeno do aquecimento global e seus efeitos nas populações.

Assim sendo, entendendo o comportamento das variáveis de temperatura, populações, gases estufa e luminosidade ao longo do tempo e da relação entre elas, podemos criar cenários com o objetivo de prever comportamentos futuros em relação ao aquecimento global e com isso contribuir para que sejam encontradas soluções para este problema. Esta análise é importante por permitir uma descrição qualitativa do aquecimento global usando um modelo simples.

A relevância deste tema pode ser comprovada tendo em vista o grande espaço que ocupa na agenda dos governos mundiais, de organizações não-governamentais e de toda a sociedade e, que sem dúvida continuará na pauta por muitos anos.

O estudo do aquecimento global desperta o interesse de diversas áreas da ciência, sendo, portanto um tema de grande relevância científica. A proposta de tratar o assunto através de uma perspectiva dinâmica traz, em si, uma série de questões importantes, dentre as quais vale destacar: a descrição de sistemas complexos e suas características associadas à auto-organização, formação de padrões e aleatoriedade; a análise do caos espaço-temporal; a reconstrução do espaço de estado espaço-temporal; a modelagem de sistemas ecológicos.

1.1 Organização do Trabalho

Quanto à organização, este trabalho está dividido em quatro capítulos. Este primeiro capítulo apresenta uma introdução, abordando a motivação, os objetivos, e uma breve descrição das contribuições desse trabalho.

Ferramentas não-lineares relacionadas à análise de séries temporais são apresentadas no Capítulo 2. A reconstrução do espaço de estado e as técnicas de predição são discutidas, bem

como a aplicação da análise não-linear de séries temporais considerando diferentes séries temporais de temperatura da Terra. Com base na análise dessas séries, é realizada a predição do futuro, fazendo uma estimativa da temperatura para os próximos 20 anos. Neste capítulo também são descritas as fontes onde as séries temporais de temperatura e de dióxido de carbono (CO_2) foram obtidas.

No Capítulo 3 apresenta-se o modelo *Daisyworld*, discutindo as modelagens matemáticas para o modelo original e para o modelo proposto com a inclusão dos gases estufa. Neste capítulo também são apresentadas as simulações numéricas dos referidos modelos e uma revisão de literatura. Uma análise da dinâmica não-linear do modelo *Daisyworld* também é realizada neste capítulo. A evolução de transientes de temperatura é considerada e a variabilidade climática é descrita através de uma variação senoidal da luminosidade. Simulações numéricas são investigadas a fim de apresentar uma descrição qualitativa do fenômeno, dedicando-se uma atenção especial ao comportamento caótico do sistema.

Finalmente, no Capítulo 4 são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho, e algumas considerações finais.

2 ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Uma série temporal é um conjunto discreto numerável de uma variável do sistema dinâmico (Savi, 2006). A análise de séries temporais é o método que busca compreender a dinâmica do sistema associado à série, seja por investigar o mecanismo gerador da série, fazer previsões de valores futuros e encontrar padrões de periodicidades relevantes nos dados ou descrever o comportamento da série (Morettin & Toloí, 2004).

Como não há um modelo matemático estabelecido que retrate os detalhes da dinâmica do aquecimento global, a utilização de técnicas de análise de séries temporais para compreendê-lo é uma alternativa bastante interessante. Isso é possível, pois existem registros de séries temporais de temperatura de diversas regiões do mundo conhecidos e disponíveis para análise.

De uma forma geral, é possível dizer que o aquecimento global é um fenômeno espaço-temporal. Portanto, a análise do fenômeno deve levar em consideração medições de temperatura em diversos pontos da superfície da Terra. No entanto, neste trabalho o fenômeno do aquecimento global será tratado através de uma perspectiva temporal, considerando temperaturas médias da Terra através de medições em regiões específicas do planeta.

Este capítulo apresenta as técnicas para análise de séries temporais utilizadas nesse trabalho. As séries temporais de temperatura são usadas como uma variável representativa da dinâmica do sistema. Uma vez que o ruído é inevitável em séries temporais experimentais, as técnicas empregadas devem ser robustas a presença de ruídos. Por ruído pode-se entender como algum problema que altere a sequência temporal natural da série. Por exemplo: registros faltantes e dados incorretos. O Método das Coordenadas Defasadas (Takens, 1981) é utilizado para a reconstrução do espaço de estado do sistema e os parâmetros de defasagem são avaliados pelo Método da Informação Mútua Média e pelo Método dos Falsos Vizinhos Próximos.

A predição não-linear simples é utilizada para modelar a dinâmica do sistema e realizar a predição de valores futuros. Dois tipos de análises são realizadas. A primeira é uma verificação considerando partes conhecidas da série temporal. A segunda aplica o procedimento para extrapolar valores da temperatura no futuro. Os métodos, citados acima, são utilizados nas simulações, através dos algoritmos implementados no software TISEAN (Hegger *et al.*, 1999).

Diferentes séries temporais são investigadas para caracterizar a temperatura global: Montreal (Canadá), Los Angeles (EUA), Rio de Janeiro (Brasil), Londres (Reino Unido), Johannesburgo (África do Sul), Pequim (China), Tóquio (Japão) e Albany (Austrália).

2.1 Técnicas Não-lineares

A idéia básica da reconstrução do espaço de estado é a de que um sinal (série) contém informações sobre as variáveis de estado, não observáveis, que podem ser usadas para prever um estado presente (Savi, 2006). Portanto, uma série temporal escalar, S_n , pode ser usada para construir um vetor de séries temporais, que é equivalente à dinâmica original do sistema, sob um ponto de vista topológico.

A reconstrução do espaço de estado precisa formar um sistema de coordenadas para capturar a estrutura das órbitas no espaço de estado, que pode ser feito usando variáveis defasadas, $S_{n+\tau}$, onde τ é uma defasagem no tempo. Então, isto é possível usando uma coleção de defasagens no tempo para criar um vetor no espaço de dimensão D_e ,

$$U(t) = \{S_n, S_{n+\tau}, \dots, S_{n+(D_e-1)\tau}\}^T \quad (2.1)$$

Esta abordagem está associada com a determinação dos parâmetros de defasagem: tempo de defasagem, τ , e dimensão de imersão, D_e . O Método da Informação Mútua Média (Fraser & Swinney, 1986) é uma boa alternativa para calcular o tempo de defasagem, τ . A determinação da

dimensão de imersão, D_e , por outro lado, pode ser avaliada pelo Método dos Falsos Vizinhos Próximos (Kennel *et al.*, 1992). O espaço reconstruído pode ser usado para a predição, sendo a predição não-linear simples a alternativa adotada para esta finalidade. A Figura 2.1 apresenta a seqüência da análise de séries temporais empregada neste trabalho. As próximas seções apresentam uma discussão de cada um dos métodos utilizados.

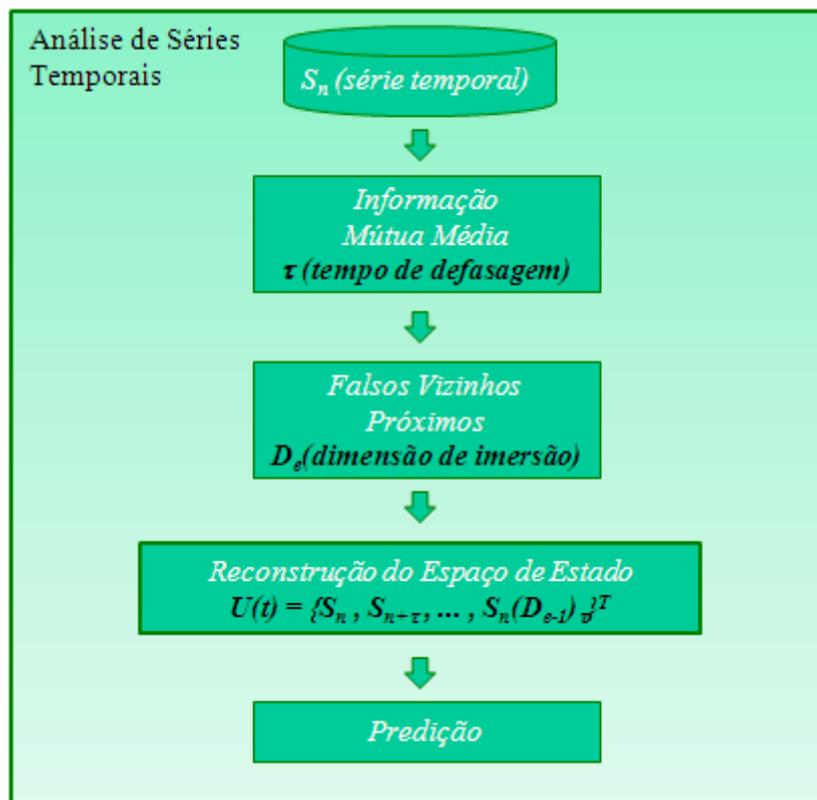


Figura 2.1: Esquema da análise de séries temporais.

2.2 Método da Informação Mútua Média

A idéia para determinação do tempo de defasagem adequado é obter as variáveis defasadas mais independentes possíveis. Fraser & Swinney (1986) estabelecem que o tempo de

defasagem τ corresponde ao primeiro mínimo local da função de informação mútua média $I(\tau)$, que é definida pela Equação 2.2,

$$I(\tau) = \sum_{n=1}^{N-\tau} I(S_n, S_{n+\tau}) \log_2 \left[\frac{I(S_n, S_{n+\tau})}{I(S_n)I(S_{n+\tau})} \right] \quad (2.2)$$

onde $I(S_n)$ é a probabilidade da medida S_n , $I(S_{n+\tau})$ é a probabilidade da medida $S_{n+\tau}$, e $I(S_n, S_{n+\tau})$ é a probabilidade da medida combinada de S_n e $S_{n+\tau}$. Quando as medidas S_n e $S_{n+\tau}$ são completamente independentes, $I(\tau) = 0$. Por outro lado, quando S_n e $S_{n+\tau}$ são iguais, $I(\tau)$ é máximo. Portanto, a análise da curva $I(\tau)$ permite determinar o melhor tempo de defasagem para ser usado na reconstrução do espaço de estado.

2.3 Método dos Falsos Vizinhos Próximos

O Método dos Falsos Vizinhos Próximos (Kennel *et al.*, 1992) foi originalmente desenvolvido para determinar o número de coordenadas de defasagem no tempo necessárias para recriar a dinâmica de sistemas autônomos, mas isto foi estendido para examinar o problema de determinar a dimensão de imersão adequada.

Este método se baseia na busca de uma dimensão mínima onde não ocorra cruzamento de uma órbita consigo mesma. Sendo assim, procura-se determinar se um vizinho é “verdadeiro” ou “falso” apenas em virtude da projeção do sistema em uma determinada dimensão.

Em uma dimensão de imersão que seja muito pequena para mostrar o atrator, nem todos os pontos que se encontram próximos um dos outros são vizinhos por causa da dinâmica. Alguns estão realmente longe uns dos outros e simplesmente aparecem como vizinhos por causa da estrutura geométrica do atrator que foi projetado em uma dimensão menor (Kennel *et al.*, 1992).

A Figura 2.2 apresenta um esquema caracterizando a presença de falsos vizinhos. No primeiro quadro, exibido em uma dimensão, todos os pontos estão aparentemente próximos. Ao exibir a imagem do primeiro quadro, só que agora em duas dimensões, observa-se que um ponto está afastado do grupo de pontos e no quadro final, em três dimensões, dois pontos se afastaram, caracterizando-se como falsos vizinhos.

Para utilizar o Método dos Falsos Vizinhos Próximos, um espaço de dimensão D é considerado onde o ponto U_n tem r -ésimos vizinhos próximos, U_n^r . A condição para decidir se os vizinhos são falsos é dada através de uma norma euclidiana avaliada em diferentes dimensões. O quadrado da distância Euclidiana entre esses pontos é:

$$r_D^2(n, r) = \sum_{k=0}^{D-1} [S_{n+k\tau} - S_{n+k\tau}^r]^2 \quad (2.3)$$

Agora, passando da dimensão D para $D+1$ através do tempo de defasagem, há um novo sistema de coordenadas e como consequência uma nova distância entre U_n e U_n^r . Quando essas distâncias mudam de uma dimensão para outra, existem falsos vizinhos. A dimensão do espaço apropriada pode ser obtida quando não há mais falsos vizinhos após o aumento da dimensão.

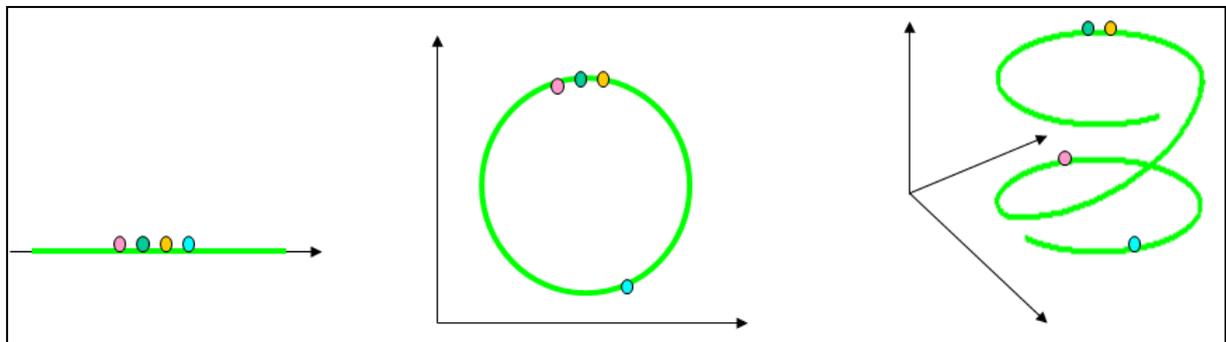


Figura 2.2: Esquema representando o método dos falsos vizinhos com $D = 1, 2$ e 3 .

2.4 Predição

Predição é uma aplicação específica relacionada à modelagem de sistemas que usa uma série temporal conhecida, chamada de passado, $S_n, n = 1, \dots, N$ para estimar valores futuros, chamada de futuro, $S_{n+p}, n = N + 1, \dots, N + p$. Este modelo estabelece uma forma para estimar séries futuras: $P_{N+1}, P_{N+2}, \dots, P_{N+p}$. A Figura 2.3 mostra um gráfico esquemático relacionado ao problema da predição. O procedimento de verificação pode ser realizado utilizando partes conhecidas da série e estabelecendo uma comparação entre os valores estimados como valores futuros e os valores da série original (Savi, 2006; Pinto & Savi, 2003).

De uma forma geral, as técnicas de predição podem ser classificadas em métodos lineares e não-lineares ou, alternativamente, em métodos locais e globais. Uma visão geral dos principais aspectos relacionados à análise de séries temporais e predição não-linear é apresentada nas referências (Pinto & Savi, 2003; Kantz & Schreiber, 1997; Abarbanel, 1995; Casdagli, 1989; Schreiber, 1999; Weigend & Gershenfeld, 1994).

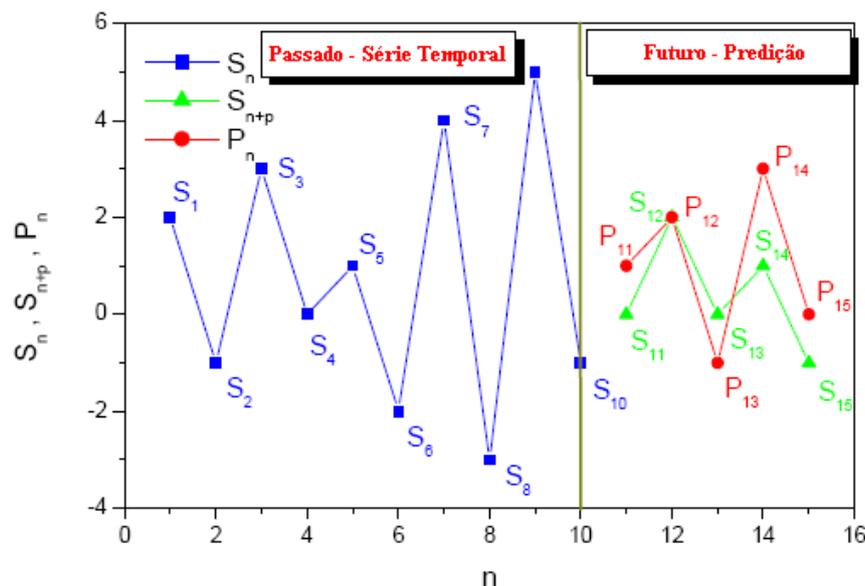


Figura 2.3: Predição de séries temporais.

Uma alternativa para a predição de séries temporais é através do Método da Predição Não-Linear Simples, que se baseia na reconstrução do espaço de estado. Após a reconstrução, para realizar a predição em um instante de tempo Δn ($\Delta n = 1, \dots, p$) a frente de U_N , é necessário definir um parâmetro ε que está relacionado com o tamanho da vizinhança $V_\varepsilon(U_N)$ em torno do ponto U_N .

Portanto, para todos os pontos U_n fechados dentro do raio ε para U_N ($U_n \in V_\varepsilon(U_N)$) encontram-se os pontos de S_n (termos da série temporal) e suas respectivas predições $S_{n+\Delta n}$. A predição $P_{N+\Delta n}$ é então calculada a partir da média aritmética das predições individuais $S_{n+\Delta n}$:

$$P_{N+\Delta n} = \frac{1}{|V_\varepsilon(U_N)|} \sum_{U_n \in V_\varepsilon(U_N)} S_{n+\Delta n} \quad (2.4)$$

onde, $|V_\varepsilon(U_N)|$ representa o número de elementos da vizinhança $V_\varepsilon(U_N)$.

2.5 Fonte das Séries de Temperatura e CO₂

Uma das dificuldades para analisar séries temporais de temperatura e da emissão de gases estufa é encontrar fontes confiáveis dessas informações. Dentre os principais problemas destacam-se a descontinuidade das séries, os dados faltantes e a falta de padronização das informações.

As informações mais completas de séries temporais de temperatura estão disponíveis no NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Este órgão, do governo dos Estados Unidos, contem dados de temperaturas médias diárias seguindo os padrões estabelecidos pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Ao todo, existem mais de 9.000 estações meteorológicas distribuídas por cidades e embarcações em todo o mundo.

Os dados mais antigos são de 1929, mas é a partir de 1973 que eles passam a estar mais completos e a serem medidos em um número consideravelmente maior de estações. Alguns períodos de algumas estações não estão disponíveis devido a restrições na obtenção dos dados ou problemas de comunicação. Para o cálculo da média diária são utilizadas, no mínimo, quatro medições. O erro destas medições não é fornecido, sendo informado apenas, que os dados coletados passam por controle de qualidade para minimizar a ocorrência de ruídos e se espera uma porcentagem muito pequena presente no resumo diário (NOAA, 2009).

Este trabalho considera oito séries de temperatura associadas a diferentes estações de medição ao longo de todo o planeta. Consideram-se séries temporais medidas no período de 1989 a 2008 nas seguintes localidades: Montreal (Canadá), Los Angeles (EUA), Rio de Janeiro (Brasil), Londres (Reino Unido), Johannesburgo (África do Sul), Pequim (China), Tóquio (Japão) e Albany (Austrália). A Figura 2.4 mostra a localização dessas estações que estão distribuídas ao longo de todo o planeta. A Tabela 2.1 apresenta informações sobre a origem desses dados e o termo “USAF” significa o número da estação na base de dados “Air Force Datsav3”.

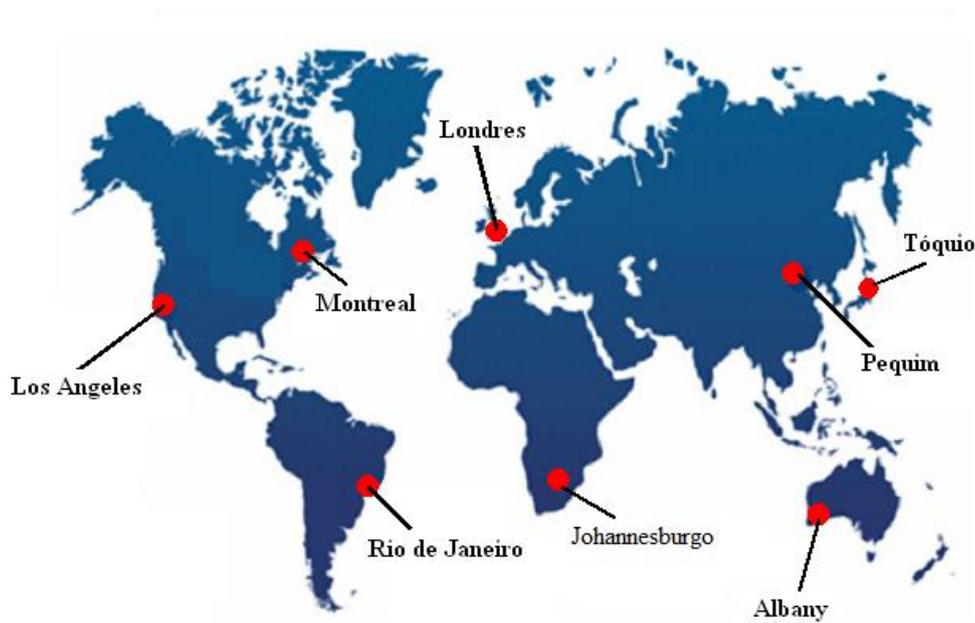
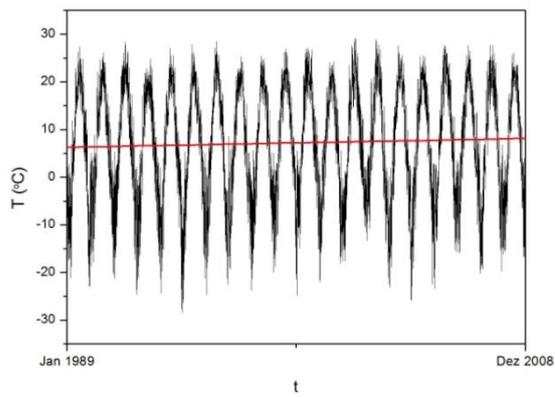


Figura 2.4: Estações meteorológicas. Imagem adaptada de Worldlog, 2009.

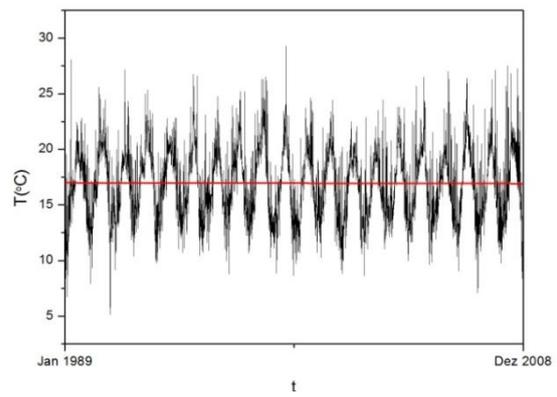
A Figura 2.5 apresenta a série temporal de temperatura, de cada estação, e sua respectiva regressão linear mostrando a tendência da evolução da temperatura. Essas séries são compostas pela média diária. Deve-se observar que essas séries temporais apresentam padrões diferentes. Observa-se um crescimento linear da temperatura em Montreal (+2,22°C), Londres (+0,64°C), Johannesburgo (+1,18°C), Pequim (+0,10°C), Tóquio (+0,95°C) e Albany (+0,11°C). Porém, ocorre um decaimento linear da temperatura em Los Angeles (-0,09) e no Rio de Janeiro (-0,55). Outra característica importante dessas séries está relacionada com a sua faixa de temperatura. Cada uma tem valores mínimos e máximos que dependem dos aspectos climáticos da sua região geográfica.

Tabela 2.1: Origem dos dados (NOAA, 2009).

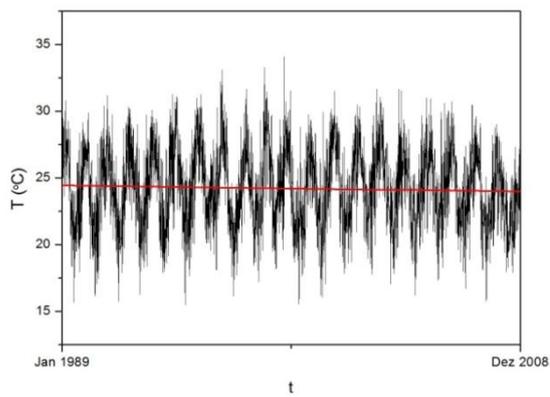
USAF	Nome da Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
716270	Montreal	45,467°N	73,750°O	29,90
722950	Los Angeles Intl Arpt	33,938°N	11,840°O	99,40
837550	Rio de Janeiro Aero	22,900°S	43,167°O	3,00
037720	Londres/Heathrow	51,483°N	0,450°O	25,00
683680	Johannesburgo Intl.	26,150°S	28,233°L	1720,00
545110	Beijing	39,933°N	116,283°L	55,00
476620	Tóquio	35,683°N	139,767°L	36,00
948020	Albany Airport	34,933°S	117,800°L	69,00



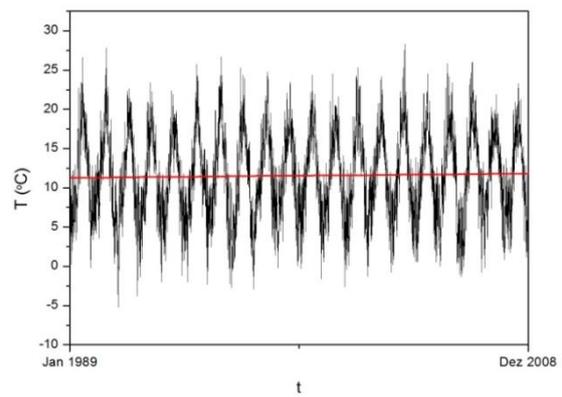
(a) Montreal



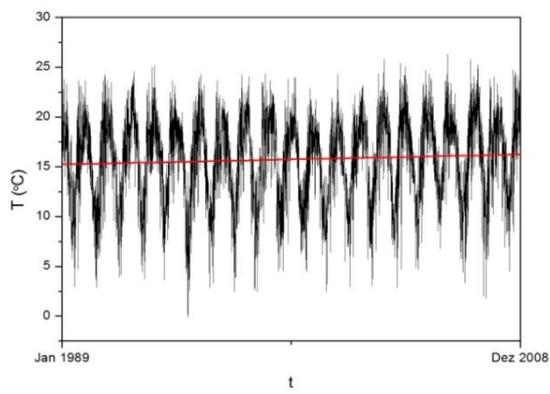
(b) Los Angeles



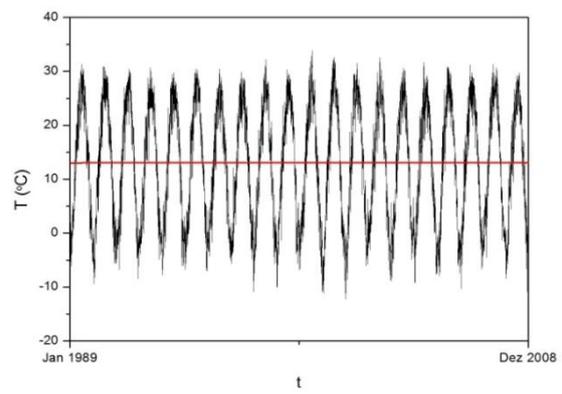
(c) Rio de Janeiro



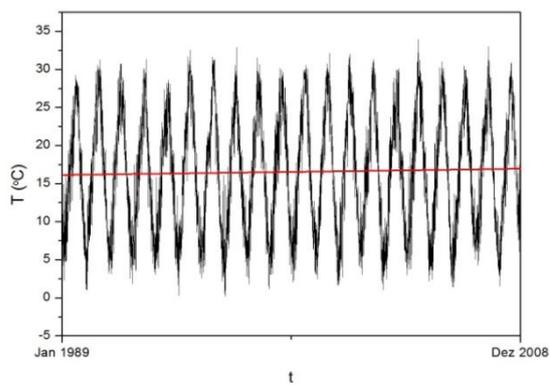
(d) Londres



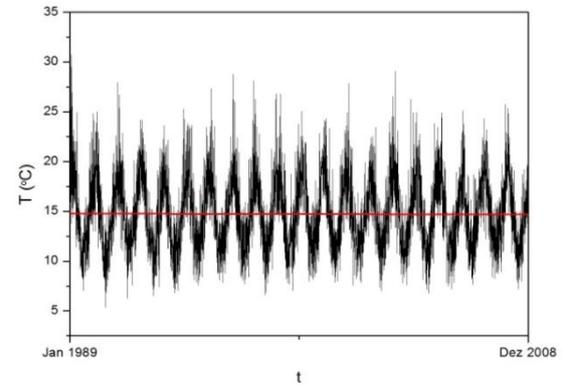
(e) Johannesburg



(f) Pequim



(g) Tóquio



(h) Albany

Figura 2.5: Séries temporais de temperatura (linha preta) e regressão linear (linha vermelha).

2.6 Resultados da Análise de Séries Temporais

A análise de séries temporais da temperatura de pontos do planeta Terra é realizada nesta seção. Inicialmente, uma verificação do modelo é realizada considerando diferentes situações definidas por partes distintas de cada série. Posteriormente, os resultados são extrapolados para a predição de valores futuros da série.

A idéia da verificação é utilizar as séries temporais de 1989 a 1998 (10 anos) para realizar uma predição de 1999 a 2008 (10 anos). Como o período de 1999 a 2008 é conhecido, é possível verificar a capacidade do procedimento para realizar a predição. A importância do número de pontos da série é avaliada, considerando-se uma série de tempo maior, 1976-1999 (24 anos), realizando então a previsão de 2000 a 2008 (9 anos). Processos de filtragem também são avaliados considerando-se o Filtro de Média Móvel. Este filtro é usado para suavizar a série temporal, sendo definido da seguinte forma:

$$y_{n=\frac{1}{m}} = \frac{1}{m} \sum_{k=-(m-1)/2}^{(m-1)/2} S_{n+k} \quad (2.5)$$

onde m é o fator (dias) de média usado para o cálculo do filtro. O fator usado neste trabalho foi de 7 dias. Após a verificação, uma nova análise é realizada considerando a série de temperatura de 1989 a 2008 (20 anos) com o objetivo de prever os valores futuros de 2009 a 2028 (20 anos). Cabe neste momento destacar que existem pontos faltantes em algumas séries e que nenhum tratamento especial é feito para essas séries. A Figura 2.6 mostra uma linha do tempo representando o período de verificação do modelo e das previsões futuras.

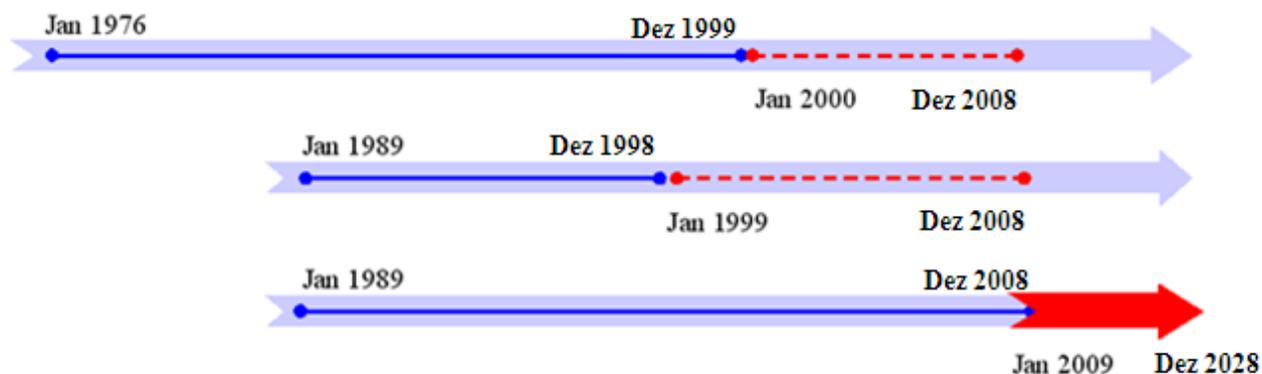


Figura 2.6: Séries temporais analisadas (linha sólida azul) e suas previsões (linha tracejada vermelha).

Com o objetivo de estabelecer uma verificação do modelo, os resultados da previsão são comparados com os das séries temporais e dois tipos de erros são definidos: o erro médio e o erro diário. O erro médio é calculado pela Equação 2.6:

$$\bar{E} = \frac{|\bar{S}| - |\bar{P}|}{\bar{S}} \quad (2.6)$$

onde \bar{S} é a média da série temporal e \bar{P} é a média da previsão. O erro diário é obtido pela Equação 2.7:

$$E_n^D = \frac{|S_n^D - P_n^D|}{(T_{max} - T_{min})} \quad (2.7)$$

sendo T_{max} e T_{min} , respectivamente, as temperaturas máximas e mínimas das séries temporais, S_n^D é o valor da série em determinado dia e P_n^D é o valor da previsão para o mesmo dia.

Basicamente, a análise da previsão é dividida em duas partes: a verificação do modelo e a previsão do futuro. Na primeira parte é mostrado que as técnicas de previsão utilizadas são capazes de capturar o comportamento geral das séries temporais de temperaturas a partir de

séries temporais conhecidas. Posteriormente, é realizada a predição do futuro, fazendo uma estimativa da temperatura até 2028.

2.7 Verificação do Modelo

A verificação do modelo é realizada considerando-se valores conhecidos da série com o objetivo de comparar a série original com os valores da predição. Inicialmente, utiliza-se a série temporal de Pequim (China) em duas situações diferentes para avaliar os aspectos gerais da predição e o número de pontos da série: de 1989 a 1998 (10 anos) para predição de 1999 a 2008 (10 anos) e de 1976 a 1999 (24 anos) para predição de 2000 a 2008 (9 anos). A influência do processo de filtragem também é avaliada, considerando séries temporais suavizadas para realizar a predição. Depois disso, outras séries temporais são tratadas considerando o mesmo procedimento para as séries de 1989 a 1998 (10 anos) para predição de 1999 a 2008 (10 anos). Essas escolhas são feitas baseadas no número de pontos da série e considerando também os dados, como se não houvesse pontos faltantes.

A partir de agora, passa-se a analisar a série temporal de Pequim (China). Inicialmente considera-se uma série de 10 anos do período de 1989 a 1998, representando 3.652 pontos. Os parâmetros de defasagem são analisados na Figura 2.7 que mostra o resultado da análise da informação mútua média e os falsos vizinhos próximos. Essa análise apresenta um tempo de defasagem $\tau = 71$ definido como o primeiro mínimo da curva de informações e uma dimensão de imersão $D_e = 14$, definida a partir de um valor onde o sistema não apresenta falsos vizinhos. Esses resultados são tomados como base para realizar as predições de 1999 a 2008, representando 10 anos.

A Figura 2.8 apresenta a série temporal original juntamente com a predição gerada pela predição não-linear simples, e o histograma de erro que mostra a distribuição dos eventos

relacionados aos erros diários entre a série original e a previsão. A previsão captura o comportamento geral da série temporal, apresentando valores médios da série de temperatura de 12,99°C e de 13,08°C para a previsão, significando uma diferença de 0,69%. Além disso, a análise do erro diário mostra que a maioria das previsões apresentou um resultado coerente com o valor original. Observa-se que 85% dos pontos apresentam erros inferiores a 10%.

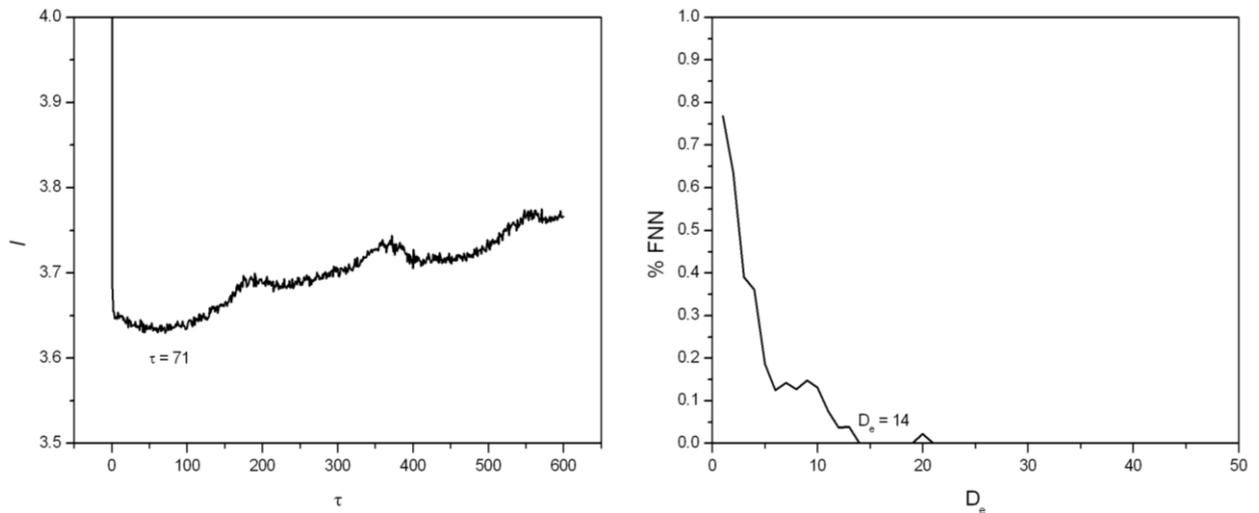


Figura 2.7: Pequim (China) – parâmetros de defasagem para série temporal - 10 anos (1989 to 1998).

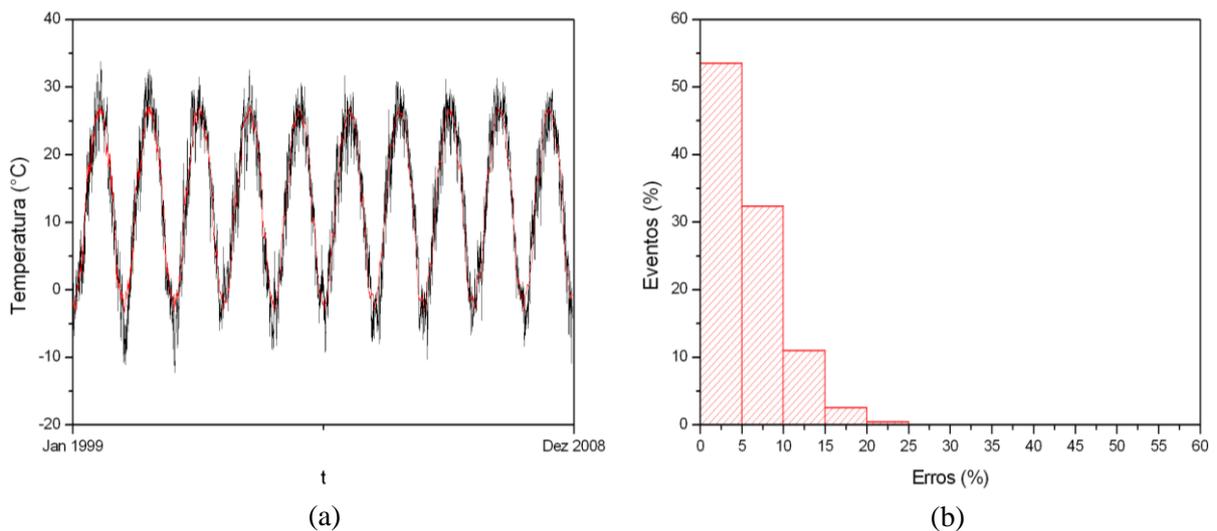


Figura 2.8: Pequim (China) - previsão. (a) Comparação entre a série temporal (linha preta) e a previsão (linha vermelha), de 1999 a 2008. (b) Histograma com erros entre a previsão e a série de temperatura.

A fim de avaliar a influência do número de pontos da série, utiliza-se uma série temporal correspondente a 24 anos, com 8.745 pontos de dados (de 1976 a 1999). A análise começa pela avaliação dos parâmetros de defasagem. A Figura 2.9 apresenta a análise da informação mútua média e dos falsos vizinhos próximos. A partir dessas análises, é possível concluir que o tempo de defasagem é $\tau = 74$ e a dimensão de imersão é $D_e = 54$. Cabe ressaltar que essa série apresenta dados faltantes que não receberam tratamento especial. Posteriormente, realiza-se uma predição para valores futuros de 2000 a 2008 (9 anos) através da predição não-linear simples, conforme mostrado na Figura 2.10.

Os resultados mostram uma boa concordância entre a série original e a predição sendo importante notar que os valores médios das duas séries estão muito próximos, apresentando valores médios de $12,98^{\circ}\text{C}$ para a série de temperatura e de $12,97^{\circ}\text{C}$ para a predição, significando uma diferença de 0,12%. Embora esta série com mais pontos apresente melhores resultados em termos de média, o histograma apresenta resultados piores que o da série com menos pontos.

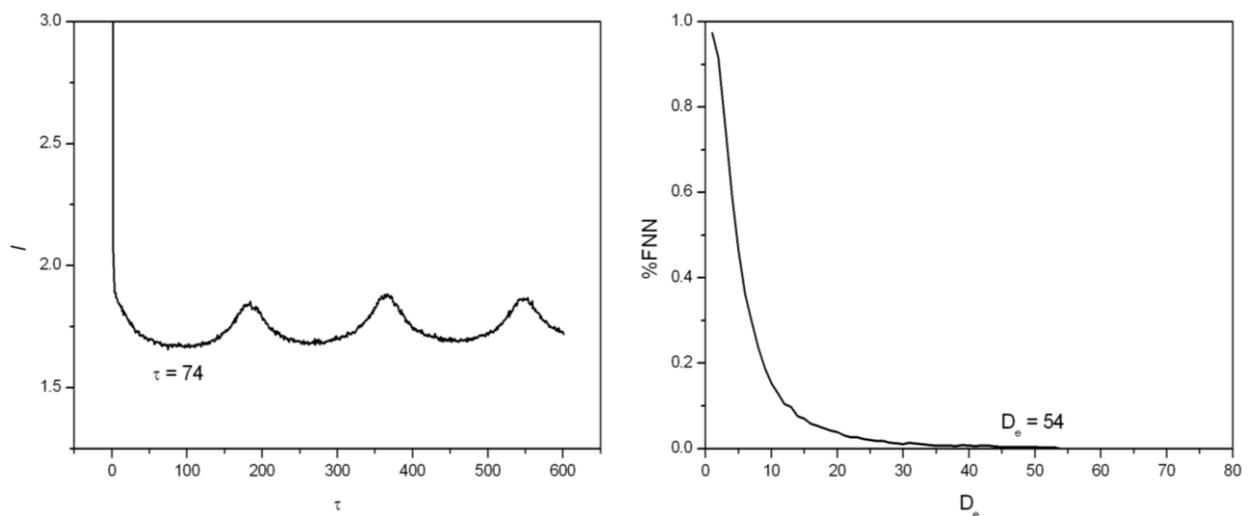


Figura 2.9: Pequim (China) – parâmetros de defasagem para série temporal - 24 anos (1976 a 1999).

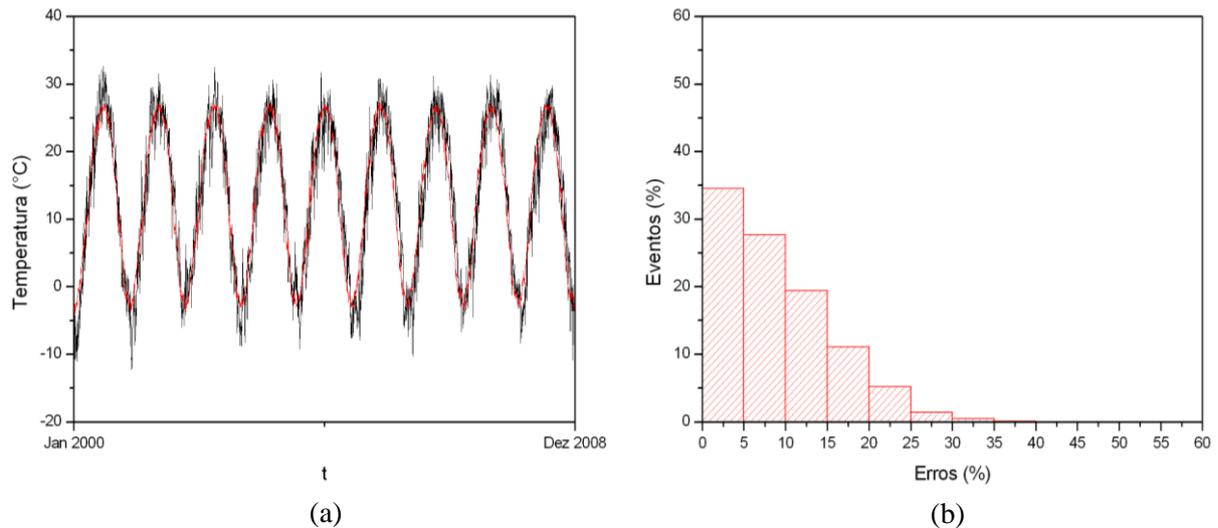


Figura 2.10: Pequim (China) - predição. (a) Comparação entre a série temporal (linha preta) e a predição (linha vermelha), de 2000 a 2008. (b) Histograma com erros entre a predição e a série de temperatura.

A análise da série de Pequim (China) mostra que a série temporal de 1989 a 2008 é capaz de capturar o comportamento da série para fins de predição. Portanto, esse período é utilizado para a análise das outras séries temporais. Antes disso, é investigada a influência do uso de filtragem na análise de séries temporais. Basicamente, o filtro de média móvel é empregado para suavizar a série temporal e, depois disso, são realizadas a reconstrução do espaço de estado e a predição. A Figura 2.11 apresenta a série temporal original e a série filtrada. A Figura 2.12 mostra a análise da informação mútua média e dos falsos vizinhos próximos e a predição. Analisando os parâmetros de defasagem é possível concluir que o tempo de defasagem é $\tau = 62$ e a dimensão de imersão é $D_e = 34$. Observa-se que o tempo de defasagem é basicamente o mesmo e a dimensão de imersão foi reduzida pelo processo de filtragem. Posteriormente, realiza-se uma predição para valores futuros de 2000 a 2008 (9 anos) através da predição não-linear simples. Mais uma vez, os resultados mostram uma boa concordância entre a série original e a predição. É importante observar que os resultados são basicamente os mesmos daqueles sem filtragem da série, possibilitando desenvolver a análise da série temporal original, sem filtragem.

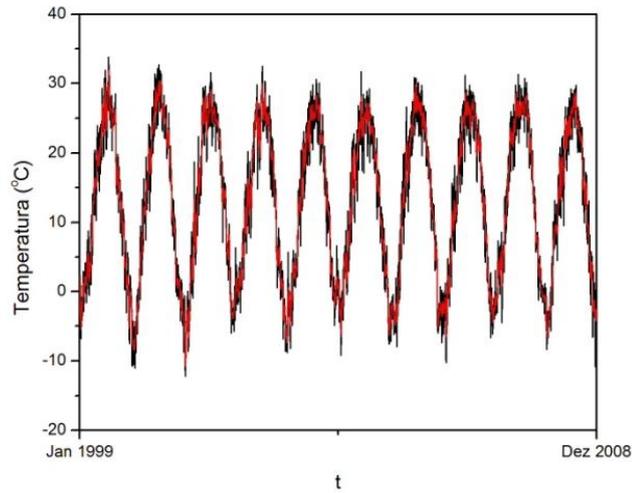


Figura 2.11: Pequim (China), Comparação entre a série temporal original (linha preta) e a série filtrada (linha vermelha), de 1999 a 2008.

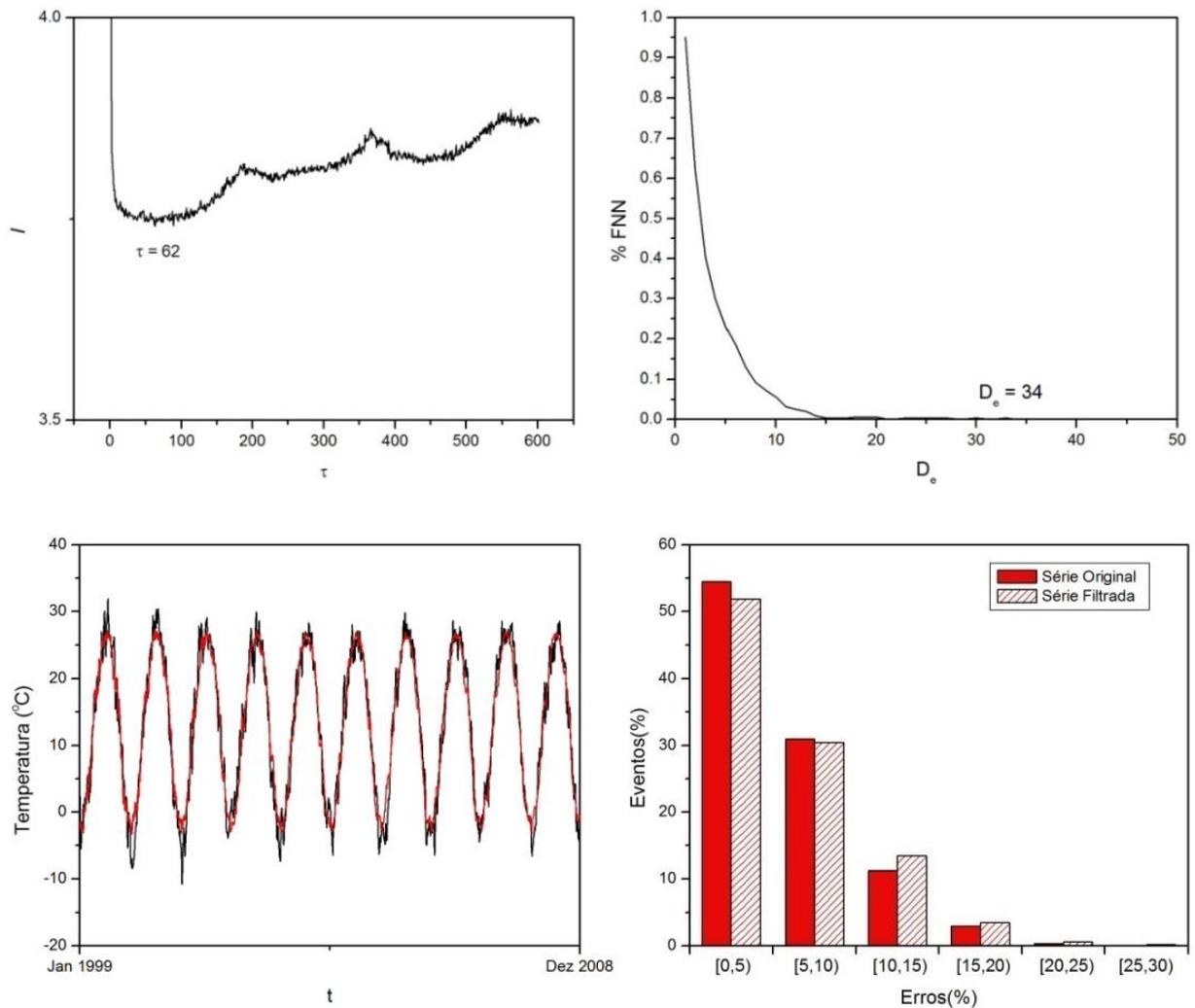


Figura 2.12: Pequim (China) – previsão. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a previsão (linha vermelha); Análise de erros.

De agora em diante, o mesmo procedimento de verificação é utilizado para as seguintes séries temporais: Montreal (Canadá), Los Angeles (EUA), Rio de Janeiro (Brasil), Londres (Reino Unido), Johannesburgo (África do Sul), Tóquio (Japão) e Albany (Austrália). Essencialmente, a série temporal com 10 anos (de 1989 a 1998) é a considerada, correspondendo a aproximadamente 3.650 pontos.

O mesmo procedimento aplicado para a série de Pequim (China) é utilizado. A análise inicia pela avaliação dos parâmetros de defasagem, mostrando a análise da informação mútua média e dos falsos vizinhos próximos. Posteriormente, a predição não-linear simples é aplicada para o modelo, para realizar a predição dos valores futuros da série de 1999 a 2008 (10 anos).

Este procedimento é repetido para cada série temporal e os resultados são mostrados nas Figuras 2.13 a 2.19. Cada figura apresenta um conjunto de quatro gráficos: análise dos parâmetros de defasagem (curvas da informação mútua média e dos falsos vizinhos próximos); análise da predição, incluindo a série temporal original junto com a predição realizada pela predição não-linear simples; e análise de erros, apresentando o histograma de erros, mostrando a distribuição dos eventos com os correspondentes erros diários entre a série temporal original e a predição.

Em geral, os resultados mostram boa concordância entre as séries original e predita e é importante notar que as séries têm valores médios muito próximos. A Tabela 2.2 resume os principais resultados apresentando os parâmetros de defasagem e a média da série temporal e os valores preditos, juntamente com o erro entre eles. Os resultados mostram que o erro em relação à média varia de 0,64% a 5,28%.

Além disso, os histogramas mostram que a maioria dos valores da predição tem erros diários pequenos, apresentando uma tendência a concentrar-se em valores menores que 10%. Na verdade, a pior previsão apresenta 50% das predições com menos de 10%, enquanto a melhor previsão apresenta 85% das predições com menos de 10%. A Figura 2.20 resume esses

histogramas dando uma idéia do comportamento geral. Esta análise mostra que o processo de predição é capaz de capturar o comportamento geral das séries temporais, especialmente em relação aos valores médios.

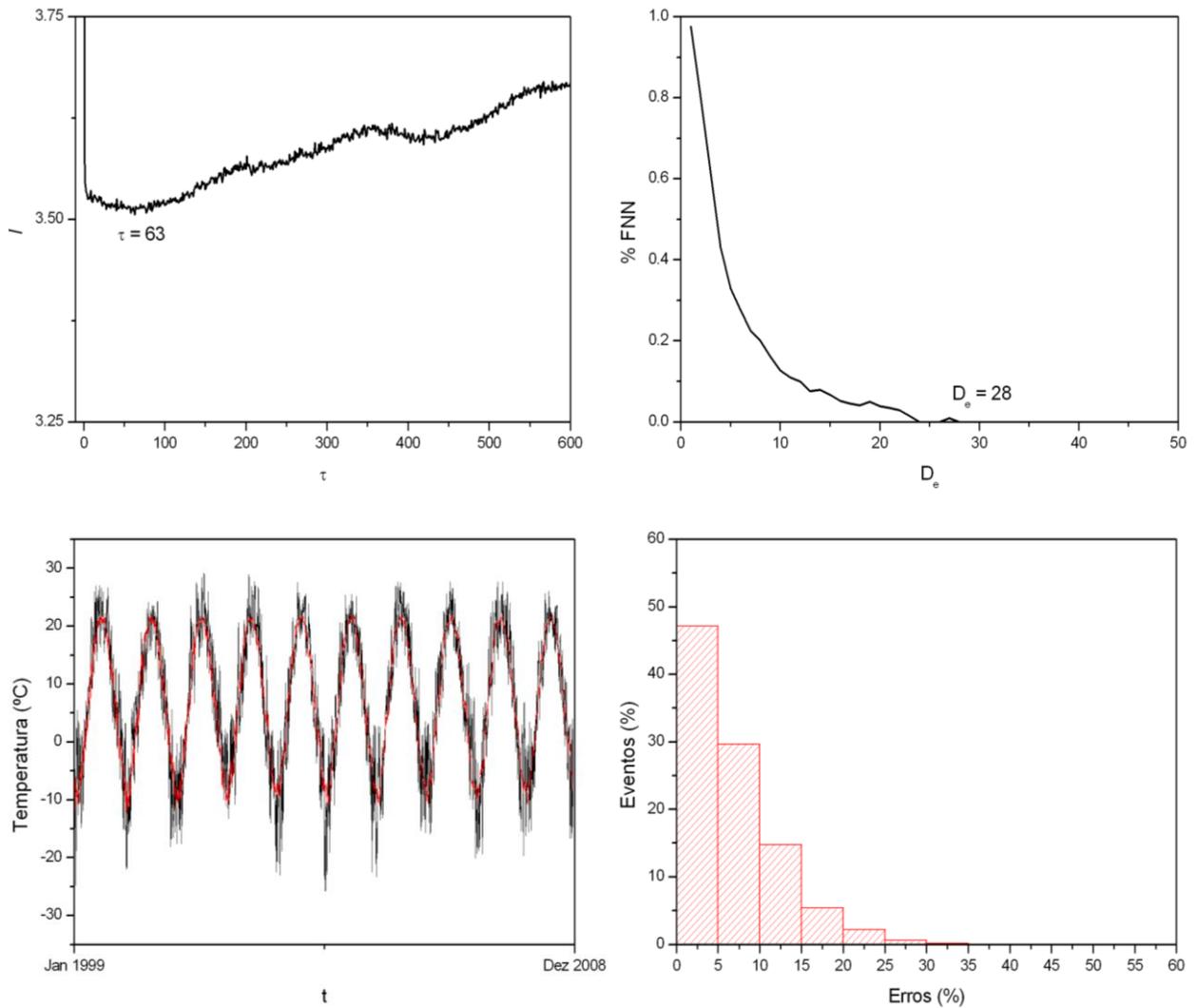


Figura 2.13: Montreal (Canadá) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.

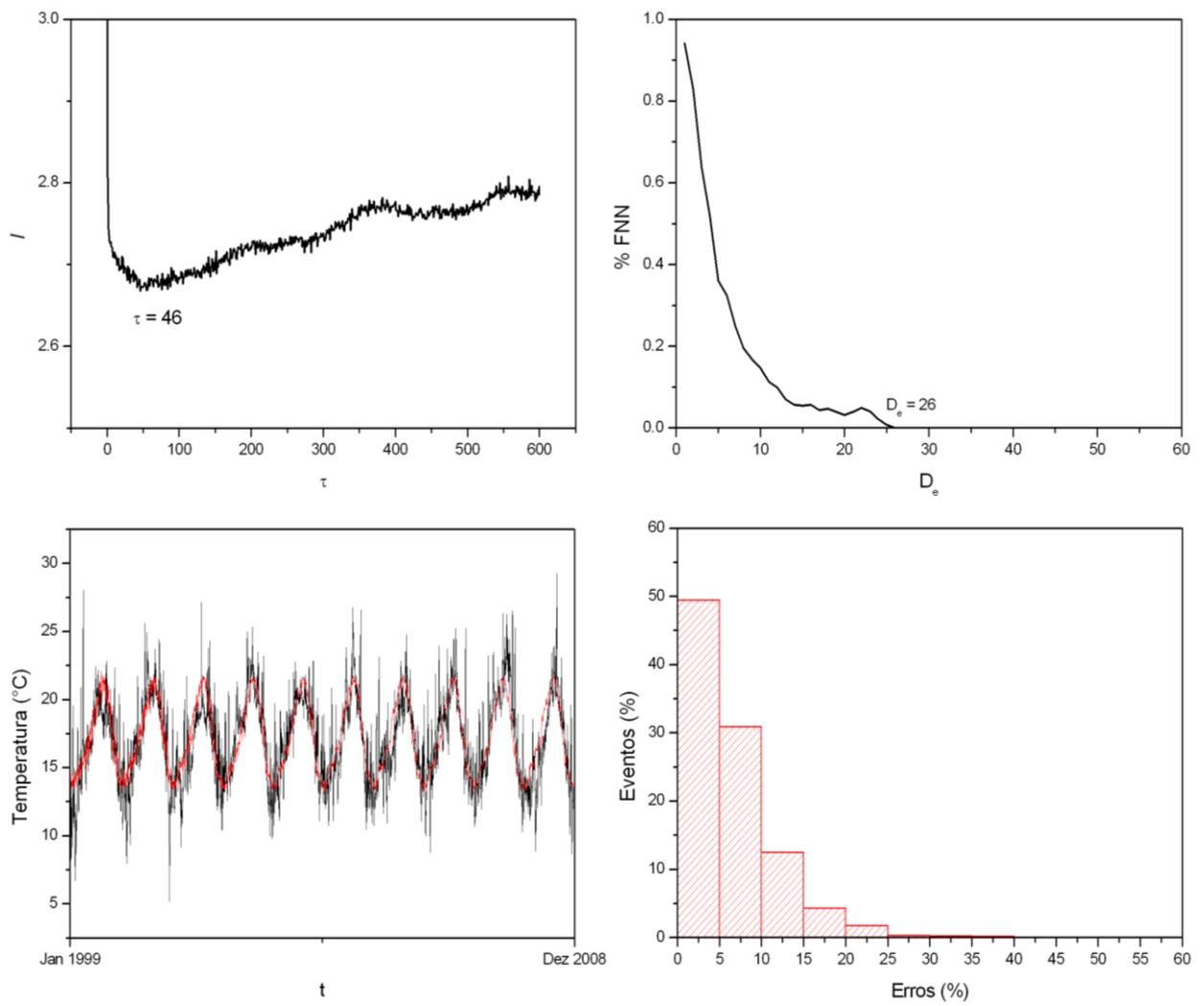


Figura 2.14: Los Angeles (EUA) - previsão. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a previsão (linha vermelha); Análise de erros.

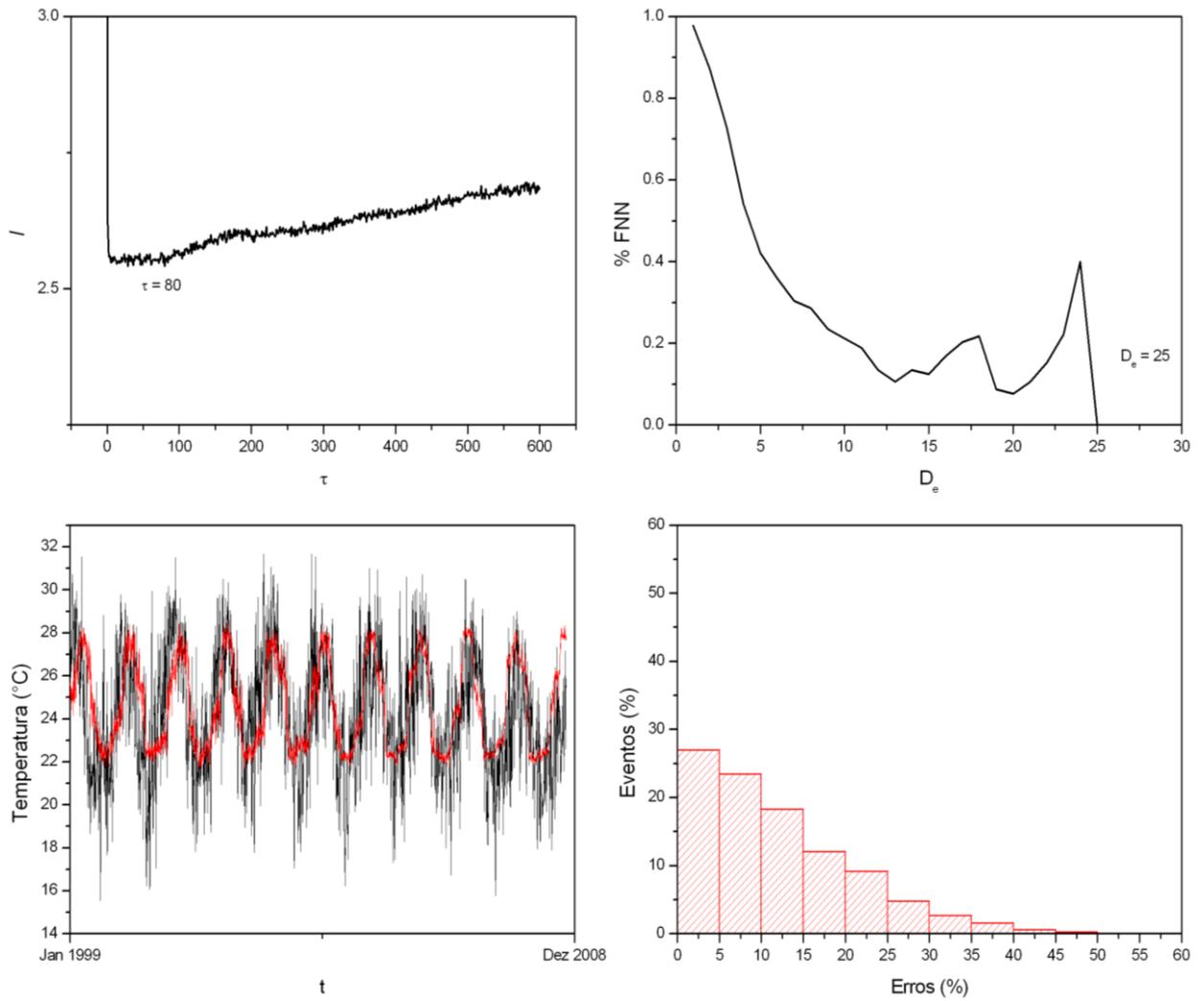


Figura 2.15: Rio de Janeiro (Brasil) – predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.

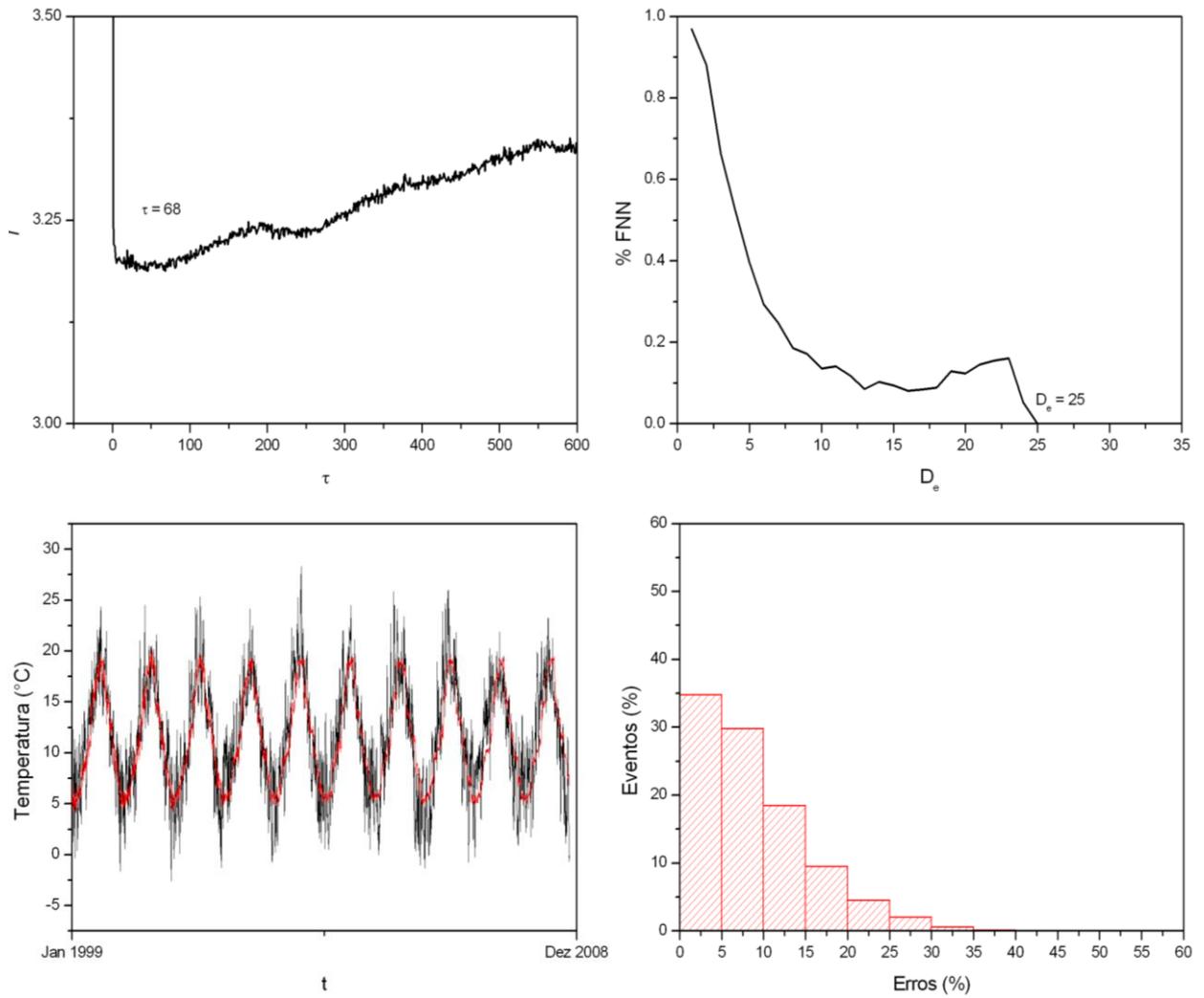


Figura 2.16: Londres (Reino Unido) - previsão. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a previsão (linha vermelha); Análise de erros.

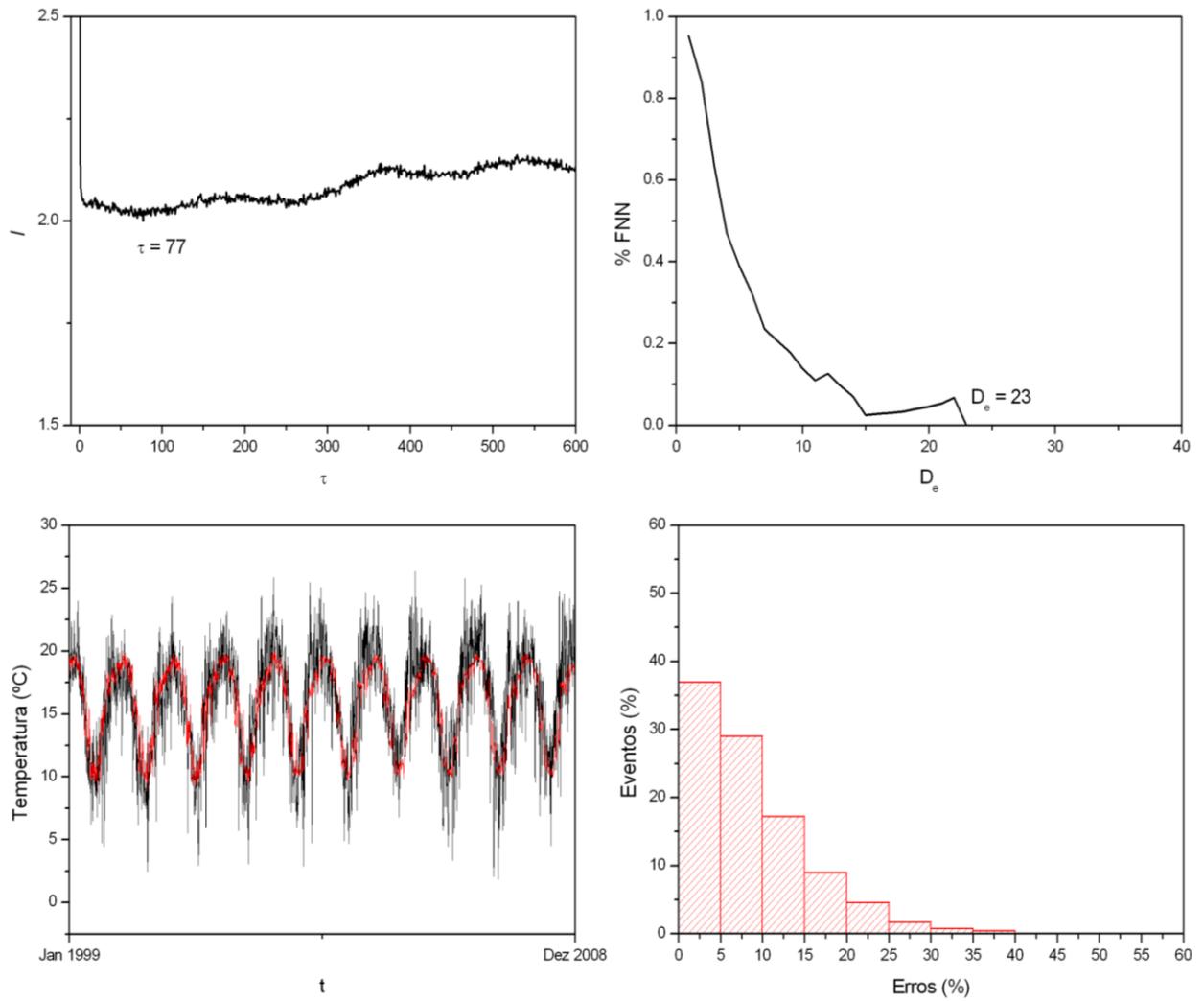


Figura 2.17: Johannesburgo (África do Sul) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.

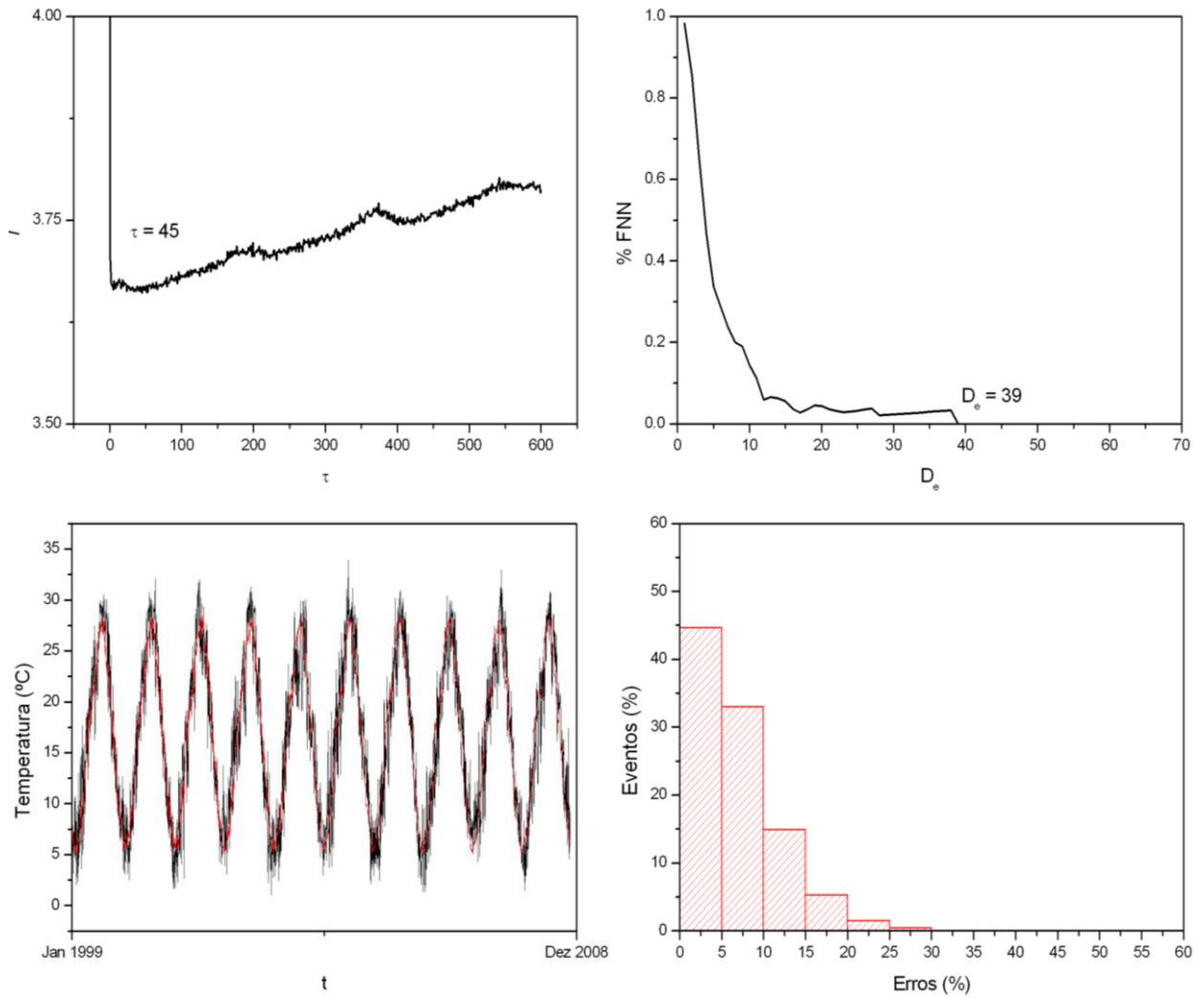


Figura 2.18: Tóquio (Japão) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.

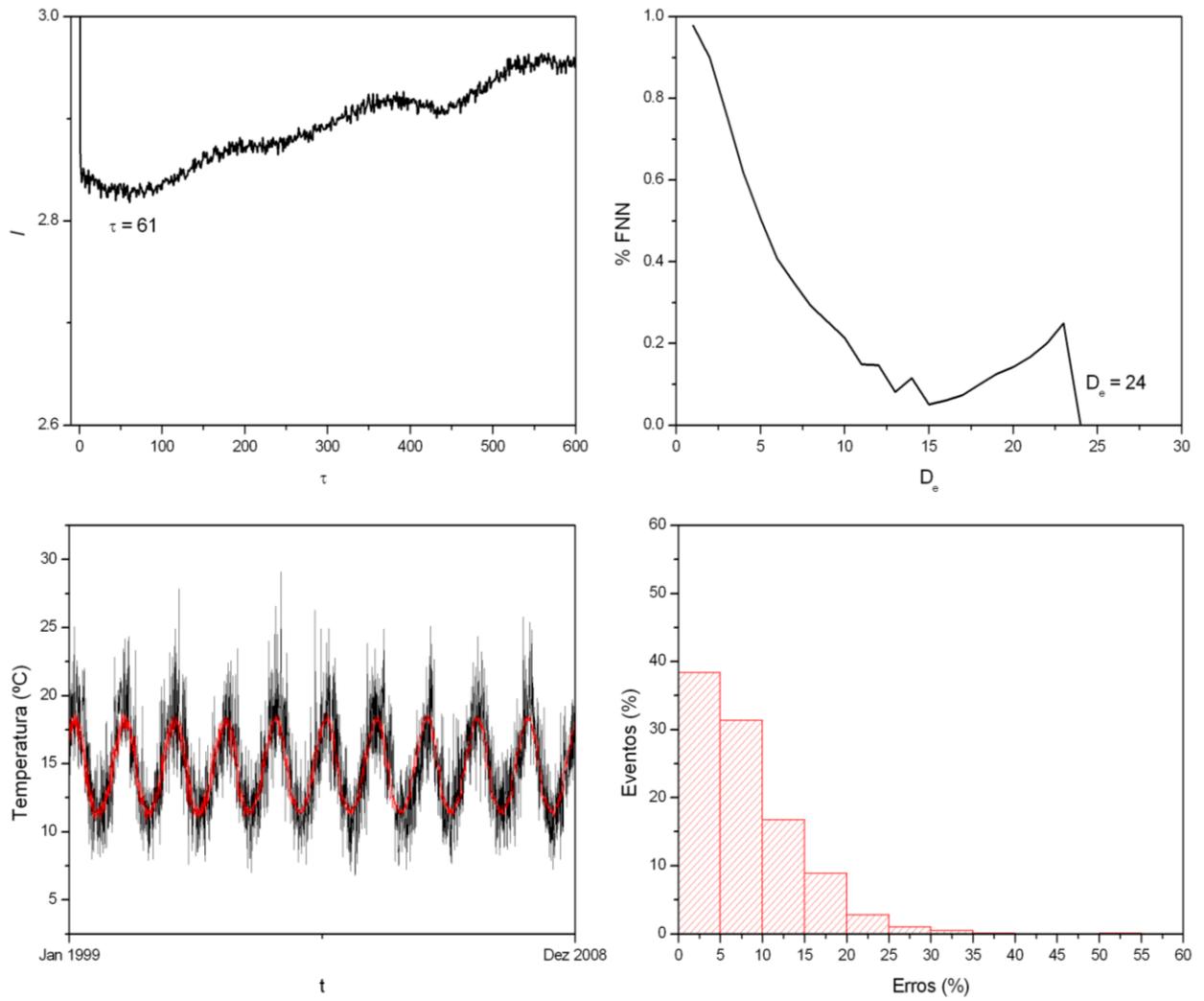


Figura 2.19: Albany (Austrália) - predição. Análise dos parâmetros de defasagem; comparação entre a série original (linha preta) e a predição (linha vermelha); Análise de erros.

Tabela 2.2: Resumo do procedimento de verificação.

Séries Temporais	Nº de Pontos	τ	D_e	Média da Série (°C)	Média da Predição(°C)	Diferença (%)
Montreal (Canadá)	3652	63	28	7,57	7,17	5,28
Los Angeles (EUA)	3651	46	26	17,11	17,22	0,64
Rio de Janeiro (Brasil)	3444	80	25	24.14	24,60	1,91
Londres (Reino Unido)	3652	68	25	11.67	11,34	2,83
Johannesburgo (África do Sul)	3651	77	23	15,92	15,68	1,51
Pequim (China)	3652	71	14	12,99	13,08	0,69
Tóquio (Japão)	3651	45	39	16,69	16,48	1,26
Albany (Austrália)	3646	61	24	14,78	14,60	1,22

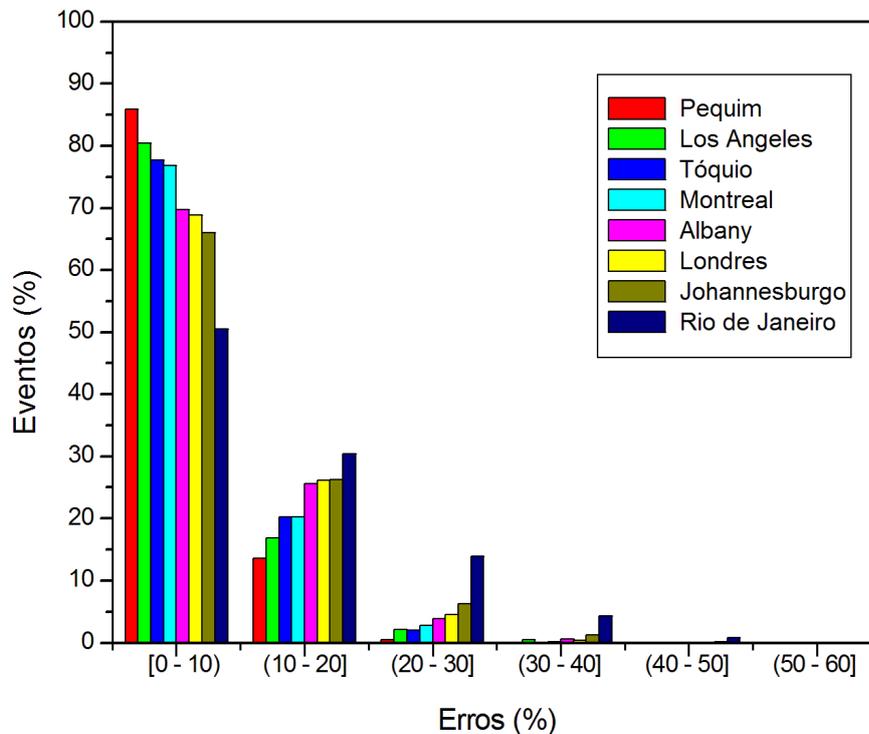


Figura 2.20: Análise dos erros diários de predição.

2.8 Predição Futura

A verificação do modelo de predição mostra que as técnicas de predição utilizadas são capazes de capturar o comportamento geral das séries temporais de temperaturas a partir de

séries temporais conhecidas. A partir de agora, passa-se a realizar a predição do futuro, fazendo uma estimativa da temperatura até 2028.

Com o propósito de realizar predições para o futuro, considera-se a série temporal com 20 anos (de 1989 a 2008) que é utilizada para estabelecer uma predição de 20 anos (de 2009 a 2028). Então, esta predição é realizada para cada uma das oito séries temporais consideradas: Montreal (Canadá), Los Angeles (EUA), Rio de Janeiro (Brasil), Londres (Reino Unido), Johannesburgo (África do Sul), Pequim (China), Tóquio (Japão) e Albany (Austrália). Os parâmetros de defasagem são avaliados e os resultados apresentados na Tabela 2.3. A seguir, a predição não-linear simples é aplicada para realizar a predição dos valores futuros de temperatura. As predições da temperatura são mostradas na Figura 2.22.

Ao estabelecer uma regressão linear, é possível observar uma tendência de aumento da temperatura ao longo do tempo de todas as séries analisadas, exceto em Albany (Austrália). O resumo desses resultados é apresentado na Tabela 2.4 e na Figura 2.21. Ao estabelecer um valor médio para esses valores da temperatura observa-se um aumento médio da temperatura de 0,29°C, para os próximos 20 anos. O resultado encontrado é coerente com Houghton (2005) que relata um aumento da temperatura durante o século XX na faixa de 0,15–0,6°C por década. Em relação ao valor médio da temperatura, a predição apresenta um valor de 15,15°C relativo a este período.

Tabela 2.3: Análise dos parâmetros de defasagem.

Séries Temporais	Nº de Pontos	τ	D_e
Montreal (Canadá)	7301	82	41
Los Angeles (EUA)	7303	97	38
Rio de Janeiro (Brasil)	7083	80	25
Londres (Reino Unido)	7300	68	28
Johannesburgo (África do Sul)	7300	87	24
Pequim (China)	7303	92	61
Tóquio (Japão)	7302	41	58
Albany (Austrália)	7291	81	24

Tabela 2.4: Resultados da predição e tendência linear de crescimento de 2009 a 2028.

Séries Temporais	Tendência Linear (°C)	Média (°C)
Montreal (Canadá)	+0,72	7,72
Los Angeles (EUA)	+0,22	16,87
Rio de Janeiro (Brasil)	+0,30	24,39
Londres (Reino Unido)	+0,28	11,67
Johannesburgo (África do Sul)	+0,28	16,01
Pequim (China)	+0,39	13,16
Tóquio (Japão)	+0,38	16,57
Albany (Austrália)	-0,24	14,77
Média Global	+0,29	15,15

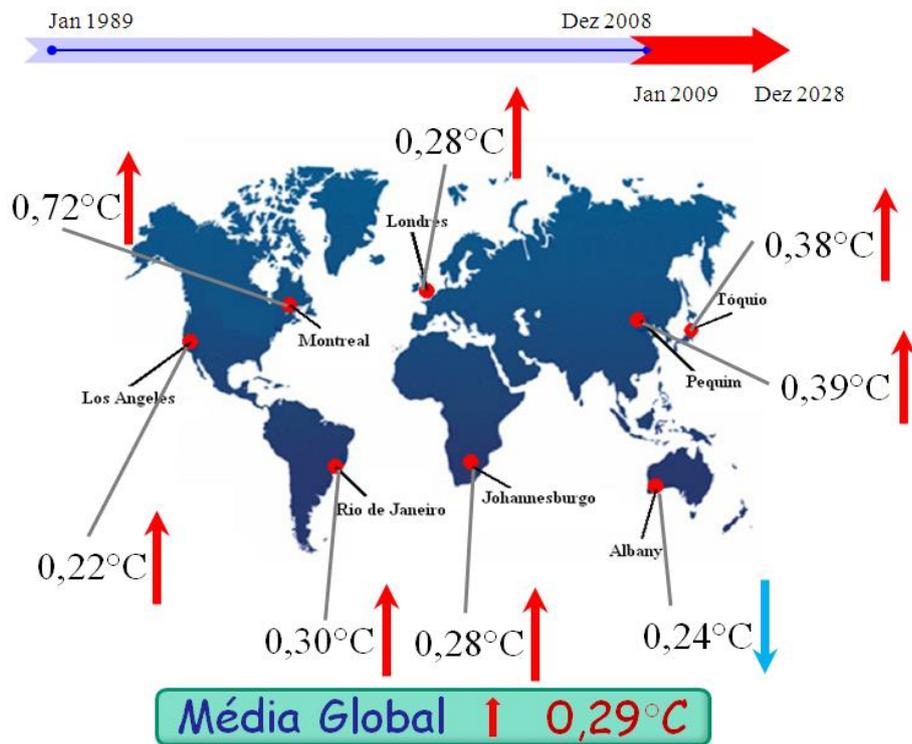


Figura 2.21: Resultados da predição.

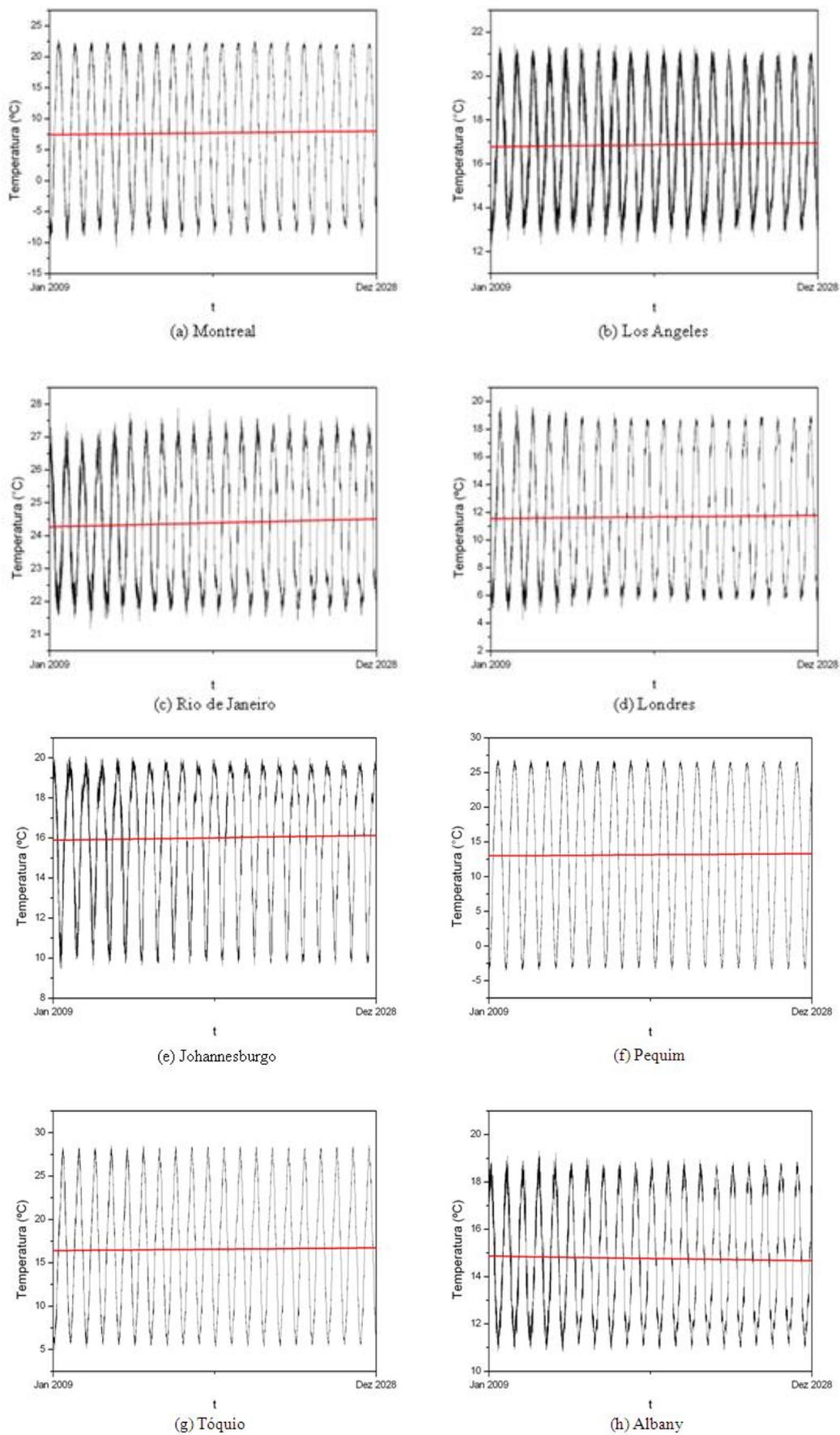


Figura 2.22: Predição de 2009 a 2028 e tendência linear de crescimento.

Para identificar o fenômeno do aquecimento global, neste trabalho, aplicou-se uma média aritmética simples das predições de temperatura encontradas em cada região analisada. Ou seja, a partir de uma análise local das particularidades de cada cidade foi possível realizar uma análise global. Uma análise local das séries de temperatura permite identificar características distintas de cada localidade, tais como: valores máximos, mínimos, médios e amplitude das temperaturas; a incidência da luminosidade solar; a variabilidade climática; a influência das estações do ano, entre outros. Isso mostra que a alteração de parâmetros locais influencia diretamente os resultados da análise global.

No próximo capítulo será introduzido o modelo matemático *Daisyworld* que contempla a possibilidade dessas duas formas de análise: local e global.

3 MODELO DAISYWORLD

Com o objetivo de representar o equilíbrio de um sistema climático, Lovelock (1983a, b, 1992) propôs o modelo *Daisyworld* (planeta das margaridas) para demonstrar que a regulação global do planeta pode ocorrer pela interação entre a vida e o ambiente. *Daisyworld* é um planeta imaginário semelhante ao planeta Terra. Sua população é composta de margaridas de diversas cores, e em um caso particular, brancas e pretas. Esse planeta é iluminado por um sol imaginário que aumenta a sua produção de calor à medida que envelhece. Sua atmosfera é transparente, não possui nuvens e também não existem gases estufa, com toda sua superfície fértil e poucos oceanos (Lovelock, 1988).

Este modelo surgiu para testar a Teoria de Gaia que descreve que o sistema planetário se auto-regula pela interação da vida (populações) e o ambiente (temperatura). Mudanças na temperatura resultam de mudanças na luminosidade solar e no albedo, que é a capacidade de reflexão do fluxo solar sobre as superfícies (Holman, 1983), das populações.

Em resumo, no *Daisyworld* a vida é representada pela população de margaridas e o ambiente é representado pela temperatura. A biodiversidade é representada pelas cores das margaridas e o modelo original considera somente duas cores: pretas e brancas.

A primeira menção sobre *Gaia* ocorreu em um artigo publicado pelo cientista britânico James Lovelock, em 1972. Em 1983, Watson & Lovelock (1983) desenvolveram o modelo original do *Daisyworld* apresentando as equações que governam o sistema. Esse sistema não-linear demonstra o comportamento das margaridas brancas e pretas mediante a variação da luminosidade e a variação da temperatura frente à variação das populações. Mais tarde, Lovelock (1988) propôs a existência de populações de margaridas de outras cores além das pretas e brancas do seu modelo original.

No ano de 1990, buscou-se encontrar características caóticas no modelo utilizando tanto técnicas qualitativas quanto quantitativas da moderna teoria do caos (Zeng *et al.*, 1990 ; Flynn, 1993).

Em 1992 a proposta da existência de outras cores de margaridas foi retomada (Lovelock, 1992). Em Robertson & Robinson (1998) foram estudados os efeitos da evolução adaptativa do *Daisyworld* permitindo que as margaridas tivessem sua temperatura ótima de crescimento deslocada eliminando a capacidade homeostática do *Daisyworld*. No entanto, neste trabalho nenhuma restrição nas condições ambientais foi levada em consideração. Tais restrições foram propostas no trabalho de Lenton & Lovelock (2000).

Posteriormente, foi proposta uma solução fechada para esses dois modelos anteriores (Sugimoto, 2002). Através da introdução de uma fonte extra de competição às equações que descrevem a interação entre as espécies de margaridas tenta-se constatar que a temperatura do planeta estará ainda numa faixa adequada para a vida (Cohen & Rich, 2000).

Daisyworld foi também estudado segundo um modelo bidimensional com a introdução de uma curvatura na superfície buscando analisar o efeito na interação do meio ambiente caso houvesse a ocorrência de uma catástrofe (Ackland *et al.*, 2003). Com base no modelo zero dimensional proposto em 1983 por James Lovelock, foi estudado um modelo unidimensional incorporando-se uma distribuição da radiação solar recebida e uma difusão de calor consistente com um planeta esférico (Adams *et al.*, 2003).

Wood *et al.* (2008) apresentou uma revisão geral sobre a literatura associada ao *Daisyworld* enfatizando suas principais características e suas diferentes abordagens para a análise. Uma das principais características do *Daisyworld* é a capacidade de descrever tanto os fenômenos locais ou globais. A Análise local pode ser feita considerando a luminosidade solar de alguma parte do planeta, representando sua evolução geral ao longo do tempo. Por outro lado, a análise global representa um comportamento médio de todo o planeta. Existem diferentes

possibilidades relacionadas com a análise do modelo *Daisyworld*. Por exemplo, a escala de tempo pode estar relacionada aos anos, representando as variações das estações; outra possibilidade é a de considerar como escala de tempo milhares de anos, que permitem representar as mudanças climáticas ou a variabilidade climática. Staley (2002) e Charlson *et al.* (1987) discutem as diferenças entre os efeitos locais e globais em que o efeito global é essencialmente relacionado aos efeitos locais. Wood *et al.* (2008) estabeleceu que o *Daisyworld* contém uma relação direta entre os aspectos locais e a regulação global.

3.1 Modelo Matemático

O primeiro passo da modelagem é a definição da vida, representada pelas margaridas, cuja evolução é descrita pela equação geral a seguir, onde $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, N)$ representa a área coberta pela população das diferentes margaridas:

$$\dot{\alpha}_i = \alpha_i [\alpha_g \beta(T_i) - \gamma] \quad (3.1)$$

o ponto sobre a variável representa a derivada no tempo, $\beta = \beta(T_i)$ é a variável da taxa de crescimento que é dependente da temperatura, γ é um parâmetro que representa a taxa de mortalidade e α_g é a fração de área descoberta do planeta.

As cores das margaridas definem a quantidade de absorção de energia e o equilíbrio entre as populações de margaridas pode controlar a temperatura do planeta. Uma primeira abordagem a este modelo arquetípico é considerar apenas duas populações de margaridas: pretas, α_b e brancas, α_w . As Margaridas pretas absorvem mais energia, enquanto margaridas brancas absorvem menos energia.

Com a finalidade de incorporar os gases estufa no *Daisyworld*, uma nova população é incluída na modelagem. A idéia é representar o aumento do albedo devido ao efeito desses gases, representados pela variável G . Nesse contexto, à inclusão do efeito estufa, variável G , tem um efeito semelhante às margaridas pretas. Portanto, o modelo é escrito como no modo clássico, mas agora existe uma função que estabelece o histórico de gases de efeito estufa:

$$G = G(t) \tag{3.2}$$

A variável α_g é a fração de área descoberta do planeta representada por:

$$\alpha_g = p - \sum_{i=1}^N \alpha_i - G \tag{3.3}$$

Aqui, p representa a proporção de terra disponível para o crescimento das margaridas e N representa a biodiversidade relativa ao número de populações envolvidas no sistema.

O albedo planetário médio do *Daisyworld*, A (adimensional), pode ser estimado a partir do albedo individual de cada população (a_i para as margaridas, a_g para a terra nua e a_G para os gases de efeito estufa) por:

$$A = \alpha_g a_g + \sum_{i=1}^N \alpha_i a_i + G a_G \tag{3.4}$$

As temperaturas locais de cada população e a temperatura da terra descoberta são dadas através de aproximações em transferência de calor (Budyko, 1969; North *et al.*, 1981). A equação fornece o grau de conexão entre os conjuntos de margaridas e independe da introdução de um espaço explícito. As temperaturas locais das margaridas, da área descoberta do planeta e dos gases, respectivamente, T_i^4 , T_g^4 e T_G^4 , são, portanto, definidas como segue:

$$T_i^4 = q(A - a_i) + T^4 \quad (3.5)$$

$$T_g^4 = q(A - a_g) + T^4 \quad (3.6)$$

$$T_G^4 = q(A - a_G) + T^4 \quad (3.7)$$

onde T é a temperatura média global do *Daisyworld*, e q é uma constante usada para calcular a temperatura local em função do albedo (uma medida do grau de isolamento entre as regiões da superfície do planeta (Lenton & Lovelock, 2001)), que é equivalente a $q' = 20$ utilizado por Watson & Lovelock (1983). Isto é importante para estabelecer que o *Daisyworld* permaneça em equilíbrio térmico, ou seja, a energia absorvida igual à energia emitida (Foong, 2006), representada originalmente pela equação:

$$SL(1 - A) = \sigma T^4 \quad (3.8)$$

onde L (adimensional) é a luminosidade solar e S é a constante solar que estabelece a energia solar média, SL ; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, baseada na lei de Stefan-Boltzmann, que permite calcular a quantidade de radiação emitida a partir da temperatura do corpo negro (Holman, 1983). Posteriormente a Equação 3.8 foi modificada por uma equação diferencial, Equação 3.9 (Nevison *et al.*, 1999). Assim, o modelo passa a apresentar características oscilatórias tanto no comportamento das populações de margaridas quanto na temperatura média global, aproximando-se um pouco mais da situação real.

$$\dot{T} = \frac{1}{c} [SL(1 - A) - \sigma T^4] \quad (3.9)$$

onde L , S e σ representam as mesmas variáveis da Equação 3.8, \dot{T} é a derivada da temperatura no tempo e c é uma medida da capacidade térmica média ou inércia térmica do planeta. Note que a Equação (3.8) é um caso particular da Equação (3.9) utilizada neste trabalho.

Uma das principais diferenças entre as mudanças climáticas e a variabilidade climática é a persistência de condições anômalas. Para investigar o efeito da variabilidade climática no *Daisyworld*, assume-se que a luminosidade solar apresenta uma variação senoidal representada a seguir:

$$L = \bar{L} + (L_0 \text{seno}(\omega t)) \quad (3.10)$$

Observe, que $\bar{L} = \bar{L}(t)$ podendo descrever um crescimento linear, por exemplo, e o termo $L_0 \text{seno}(\omega t)$ representa uma perturbação que pode ser associada com a variabilidade climática.

A forma da função β_i é geralmente considerada como uma função simétrica tipo sino, que representa a taxa de crescimento das populações de margaridas, em função da temperatura local T_i :

$$\beta_i(T) = \begin{cases} B \left[1 - \left(\frac{T_{opt} - T_i}{k} \right)^2 \right], & |T_{opt} - T_i| < k \\ 0, & \text{do contrário} \end{cases} \quad (3.11)$$

onde T_{opt} é a temperatura ótima, geralmente assumida como $T_{opt} = 295,5 \text{ °K} = 22,5 \text{ °C}$. O parâmetro k representa o tamanho da parábola, sendo escolhido a fim de estabelecer as condições favoráveis à vida das populações, por exemplo, entre 5°C e 40°C (De Gregorio *et al.*, 1992), que atribui $k = 17,5$. Do mesmo modo, B altera estes valores de forma a representar diferentes características ambientais. O modelo original considera que o valor de B é constante e igual a 1. A Figura 3.1 caracteriza os limites de temperatura para que haja vida no planeta. Para temperaturas abaixo de 5°C e acima de 40°C a taxa de crescimento é zero e para a temperatura $22,5 \text{ °C}$ a taxa de crescimento é máxima (Watson & Lovelock, 1983).

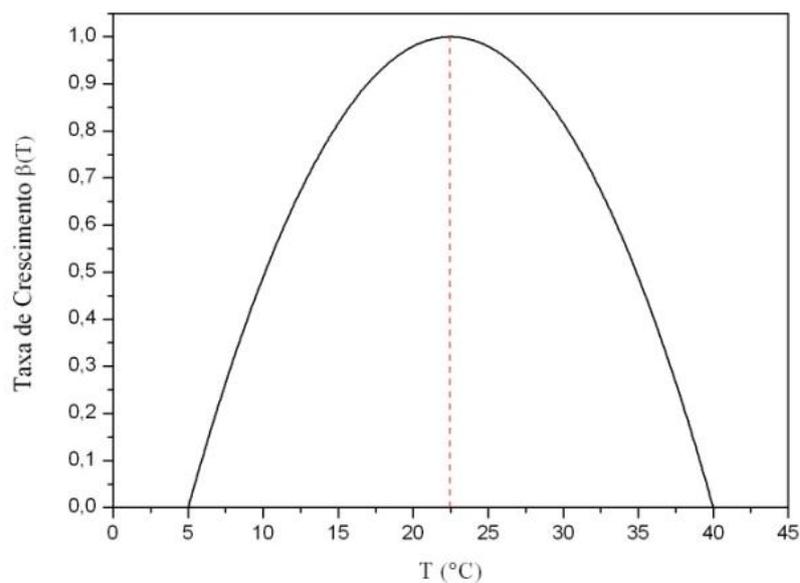


Figura 3.1: Taxa de crescimento das margaridas em função da temperatura.

A simulação numérica do modelo *Daisyworld* pode ser realizada utilizando procedimentos clássicos para integração numérica. Neste trabalho, é aplicado o método de integração Runge-Kutta de quarta ordem. Um estudo de convergência é feito comparando a diferença nos resultados simulados com diferentes passos. Os parâmetros assumidos para as simulações numéricas são os seguintes: $q=2,06\times 10^9 K^4$, $\sigma = 5.67\times 10^{-8} W/m^2 K^4$, $S = 917 W/m^2$.

Outros parâmetros são variados com o objetivo de analisar diferentes situações. Além disso, é importante ressaltar que apenas as populações de margaridas pretas e brancas são consideradas.

3.2 *Daisyworld* Clássico

Nesta seção, a dinâmica do *Daisyworld* é investigada com a finalidade de estabelecer um entendimento de como ocorre a auto-regulação do planeta. Considera-se o modelo clássico sem levar em conta os gases estufa. Inicialmente, a luminosidade é considerada constante. Os seguintes parâmetros são utilizados para esta simulação: $a_w = 0,75$, $a_b = 0,25$, $a_g = 0,5$, $\gamma = 0,3$, $\bar{L} = 1$, $L_0 = 0$, $B = 1$. As condições iniciais para as populações são: $\alpha_w = \alpha_b = 0,01$. Todas as simulações são realizadas com passo de tempo igual a 0,01.

Inicialmente, a luminosidade é considerada constante ($\bar{L} = 1$, $L_0 = 0$), assumindo a situação clássica, com $c = 0$. O *Daisyworld* possui auto-regulação devido à interação entre a vida e o meio ambiente, representados respectivamente pelas populações de margaridas e a temperatura do planeta. Portanto, o sistema planetário tende a manter uma temperatura constante adequada para a vida devido à interação entre as populações de margaridas pretas e brancas. O aumento da população das margaridas pretas tende a aumentar a temperatura do planeta já que absorvem mais energia, e o inverso ocorre em relação às margaridas brancas. Assim, o crescimento populacional é de tal forma que a temperatura permanece constante em um valor favorável, como mostrado na Figura 3.2.

A seguir, a influência da inércia térmica é investigada. Basicamente três diferentes valores do parâmetro c são considerados: 300, 1000 e 3000 J/m²K s. As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 mostram a resposta do sistema para essas situações, com as condições iniciais da temperatura = 280 °K. Observe que ocorre um comportamento oscilatório das populações de margaridas que provoca a oscilação da temperatura.

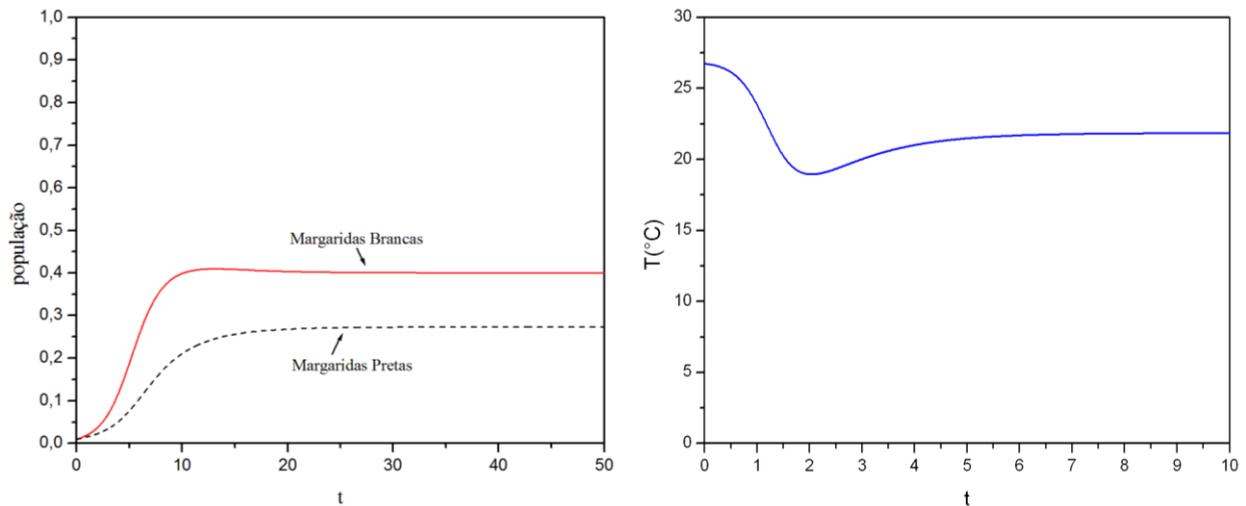


Figura 3.2: Resposta do *Daisyworld* com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 0$. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).

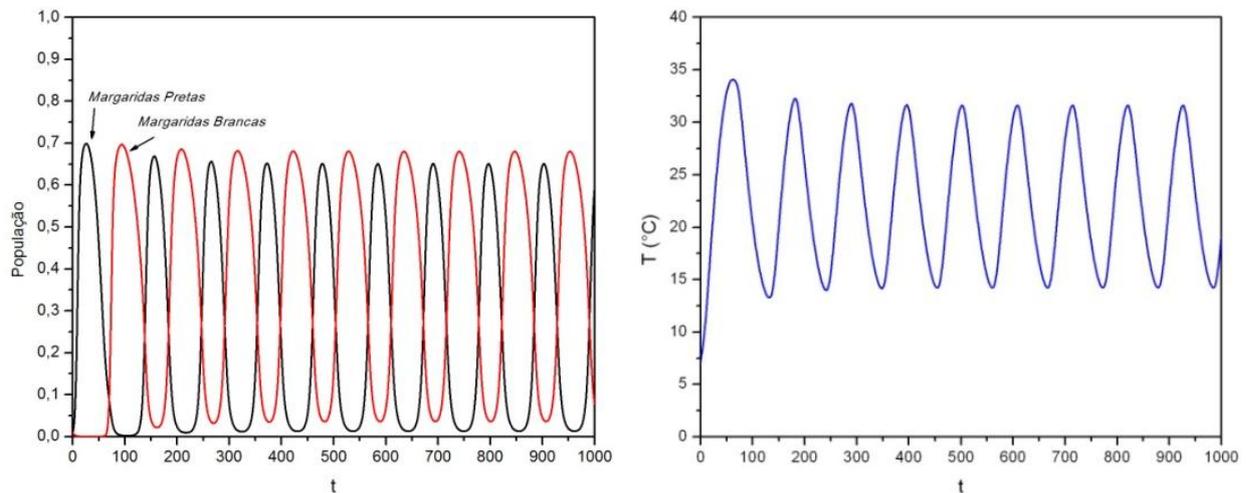


Figura 3.3: Resposta do *Daisyworld* com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 300$ J/m²K s. População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).

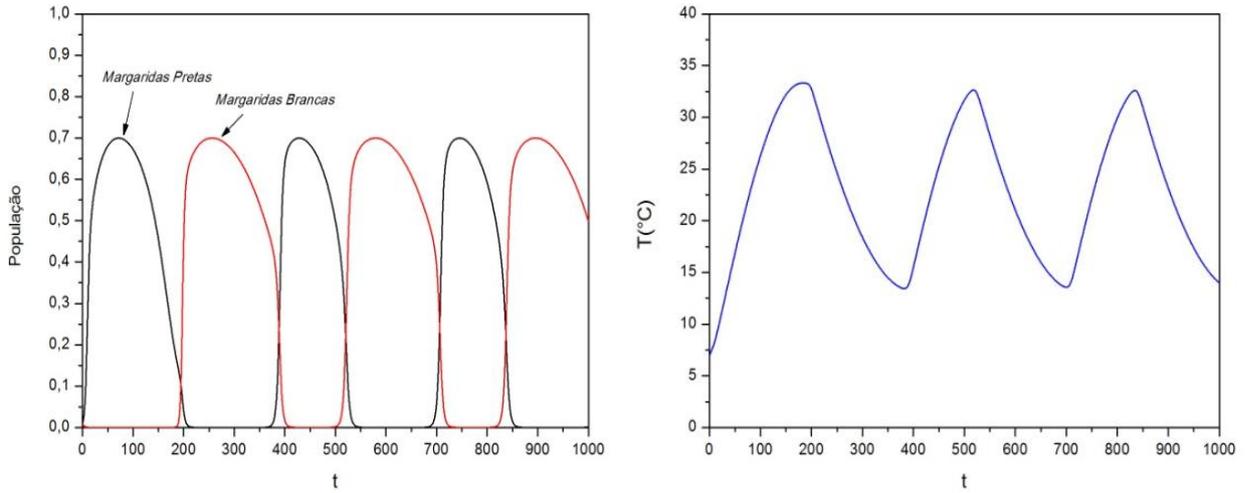


Figura 3.4: Resposta do *Daisyworld* com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 1000 \text{ J/m}^2\text{Ks}$.
População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).

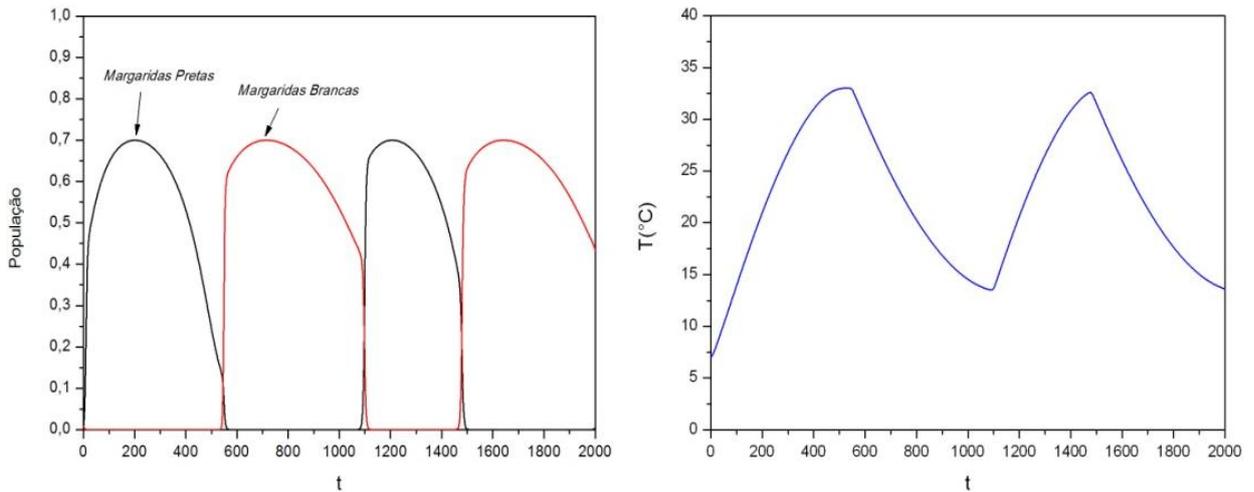


Figura 3.5: Resposta do *Daisyworld* com luminosidade solar constante ($\bar{L} = 1, L_0 = 0$) e $c = 3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$.
População de margaridas (esquerda) e temperatura (direita).

Imagina-se agora a luminosidade solar crescendo linearmente ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7; L_0 = 0$), representando uma situação mais realista no que diz respeito à evolução da radiação solar. Com essa nova condição, a temperatura de um planeta sem vida também deveria crescer linearmente, acompanhando o crescimento da luminosidade. No entanto, devido à interação entre a vida e o ambiente, o *Daisyworld* se auto-regula e o sistema planetário tende a manter a temperatura constante devido à interação entre as populações de margaridas pretas e brancas.

É possível observar que o crescimento das margaridas pretas tende a aumentar a temperatura do planeta, já que elas absorvem mais energia. Isto ocorre para valores baixos da luminosidade. Conforme a luminosidade solar vai aumentando ocorre uma diminuição da população de margaridas pretas e um aumento da população de margaridas brancas. Esse balanço entre as populações faz com que a temperatura permaneça constante.

A Figura 3.6 mostra a evolução das populações de margaridas e da temperatura, utilizando os mesmos valores para os parâmetros e as condições iniciais do exemplo anterior, mas agora com a luminosidade aumentando linearmente de 0,75 a 1,7 e $c = 0$.

Portanto, quando a luminosidade é baixa a população de margaridas pretas é predominante. Ao contrário disso, quando a luminosidade aumenta, a população de margaridas brancas também aumenta. Este efeito ocorre com a finalidade de deixar a temperatura constante. A Figura 3.6b também apresenta uma comparação da temperatura entre o planeta sem vida, quando todas as populações de margaridas estão mortas, e o planeta com vida. Com o planeta sem vida, a temperatura aumenta proporcionalmente a luminosidade solar, pois não ocorre a influência da vida no *Daisyworld*.

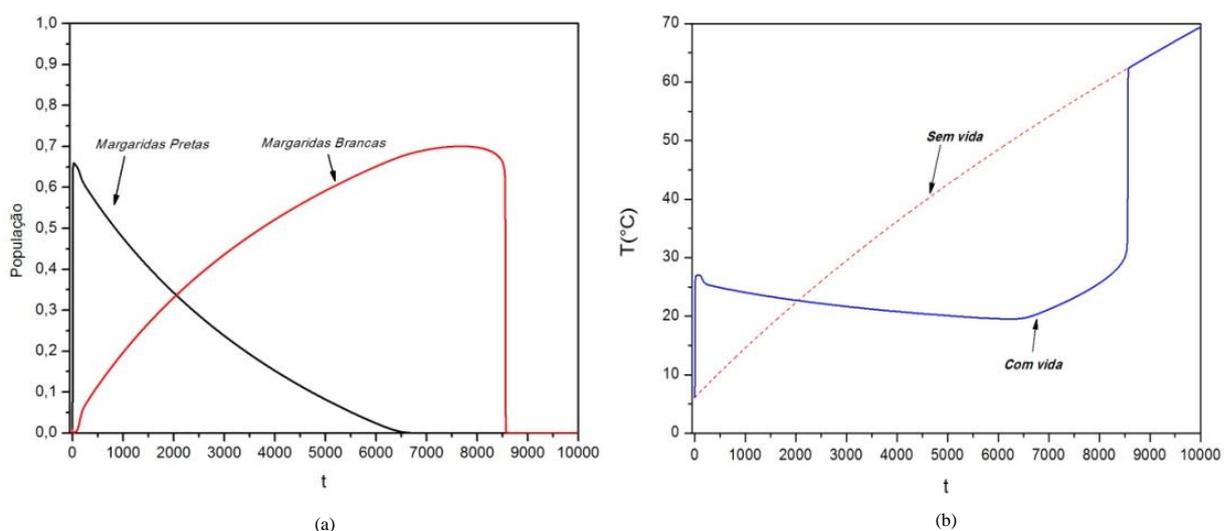


Figura 3.6: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=0$.

Neste momento observa-se a influência da inércia térmica no planeta assumindo três valores diferentes para o parâmetro c : 300 (Figura 3.7), 1000 (Figura 3.8) e 3000 $\text{J/m}^2\text{K s}$ (Figura 3.9). Mais uma vez, o aumento da inércia térmica tende a promover variações oscilatórias de todas as variáveis envolvidas e que deve ser destacado um equilíbrio adequado entre as duas populações e da temperatura.

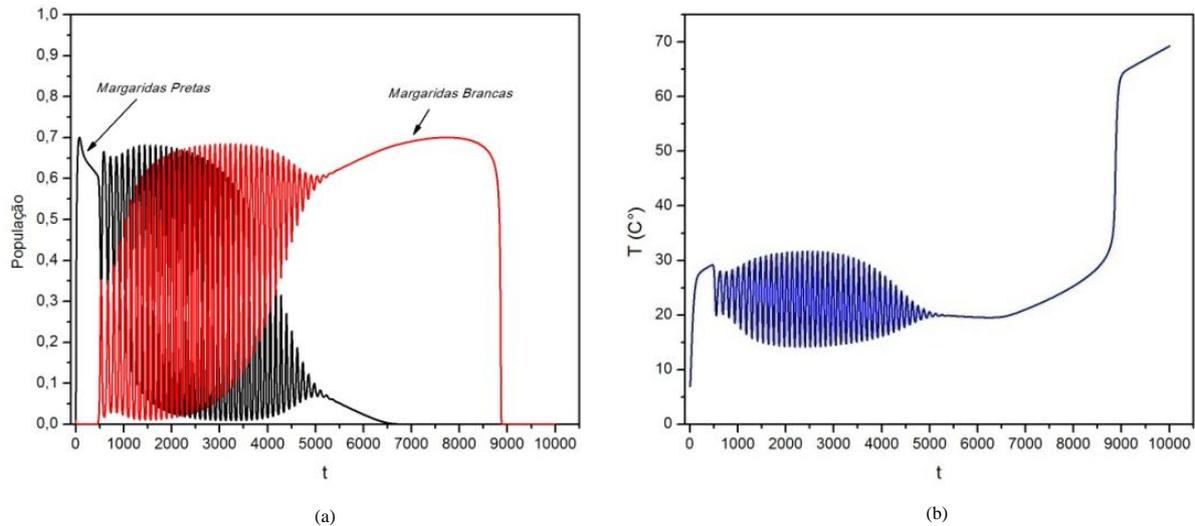


Figura 3.7: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=300 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).

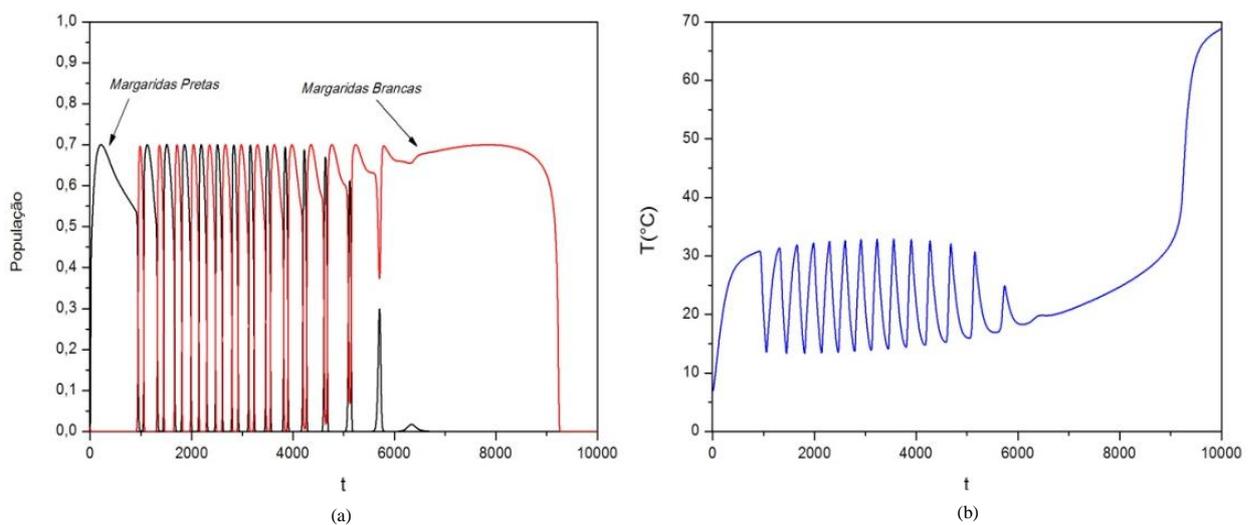


Figura 3.8: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=1000 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).

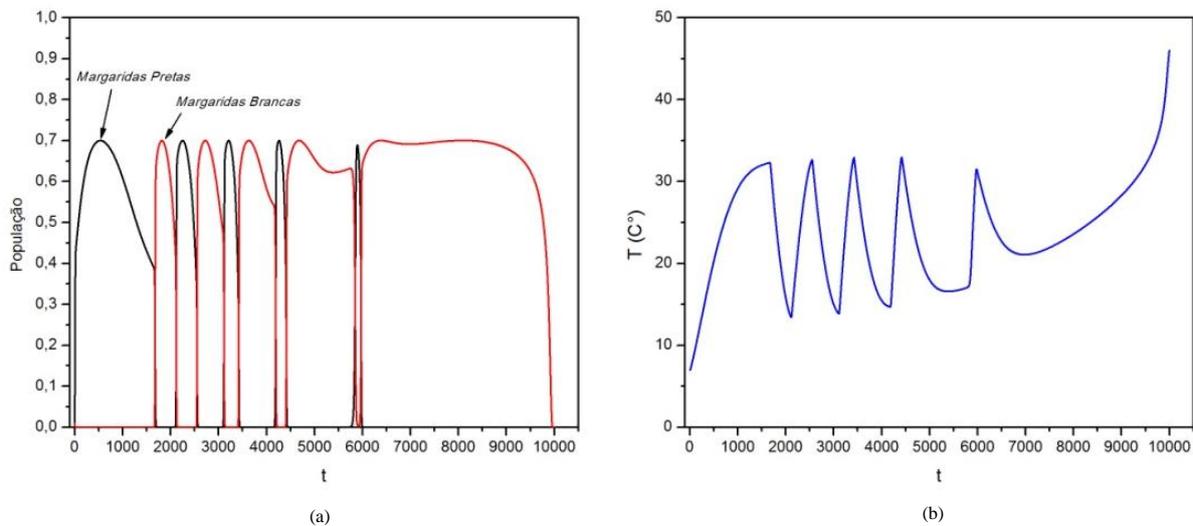


Figura 3.9: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$) e $c=3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$. População de margaridas (a) e temperatura (b).

3.3 *Daisyworld* com Gases Estufa

Esta seção considera os efeitos dos gases de efeito estufa no *Daisyworld*. Basicamente, assume-se que esses gases são previamente conhecidos e estão relacionados a uma função ou a uma série temporal. Valores experimentais são utilizados como referência para caracterizar a tendência geral desses gases.

Neste sentido, utilizam-se as emissões de CO_2 (dióxido de carbono) de 1958 a 2009 (NOAA, 2009). A Figura 3.10 apresenta a média das emissões anuais desse período. Esses valores são usados para definir $G(t)$, que representa a tendência geral dos gases. Deve-se observar que existe um crescimento linear das emissões de CO_2 , e essa informação é utilizada na simulação numérica e o tempo de intervalo assumido é de 0,01. A idéia básica desta seção é estabelecer uma comparação com os resultados anteriores, nos quais os gases estufa não foram considerados.

Inicialmente, a luminosidade é considerada constante e igual a 1. A Figura 3.7 apresenta os resultados dessa simulação mostrando que os gases estufa levam a um aumento da

temperatura do planeta. Este aumento da temperatura causa a morte das populações das margaridas em um tempo menor em comparação ao planeta sem os gases. Observa-se que embora a luminosidade seja constante, não ocorre uma estabilização das populações e da temperatura, devido à inclusão dos gases estufa. O que ocorre é a morte das populações em um tempo menor.

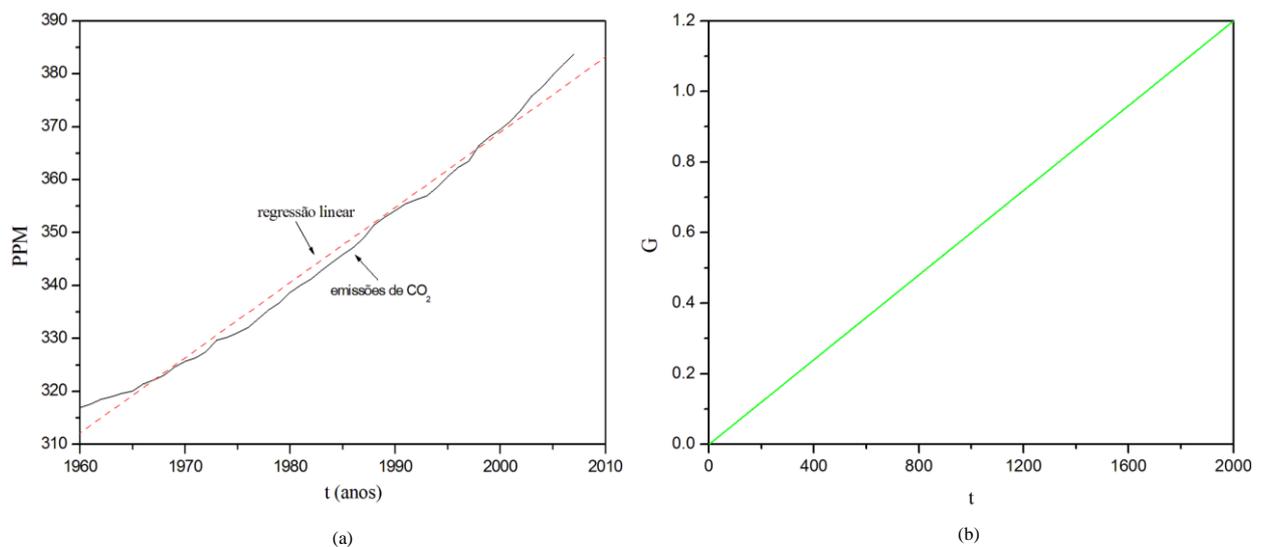


Figura 3.10: (a) Média anual das concentrações de CO₂ e (b) valores utilizados para G.

Inicialmente, um aumento linear da luminosidade ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$) é tratado e os gases de efeito estufa são incorporados ao modelo. Os parâmetros utilizados nesta simulação são os mesmos da seção anterior. A Figura 3.11 apresenta os resultados da resposta do *Daisyworld* mostrando o mesmo comportamento do caso anterior, sem gases de efeito estufa (Figura 3.6). No entanto, é importante observar que o aumento da temperatura do planeta promovido pelos gases de efeito estufa tende a causar uma morte precoce das populações de margaridas quando comparado com o planeta sem gases. A Figura 3.11 apresenta também uma comparação entre os modelos, considerando o planeta com vida e sem vida, mostrando como a interação da vida promove a auto-regulação do planeta.

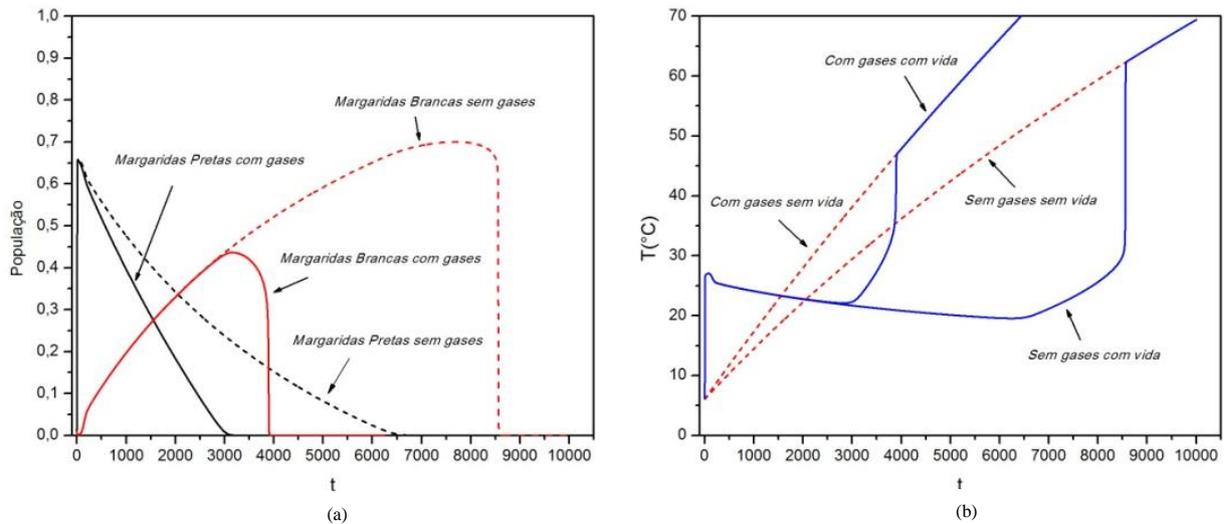


Figura 3.11: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0=0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 0$.

A próxima análise considera a influência da inércia térmica do planeta assumindo um crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$). As Figuras 3.12-3.14 mostram o comportamento do sistema para diferentes valores do parâmetro c : 300 (Figura 3.12), 1000 (Figura 3.13) e 3000 (Figura 3.14) $J/m^2K s$. Observa-se que há um equilíbrio adequado entre as duas populações de margaridas e que a temperatura tende a ser constante, no entanto, a inércia térmica provoca uma resposta oscilatória.

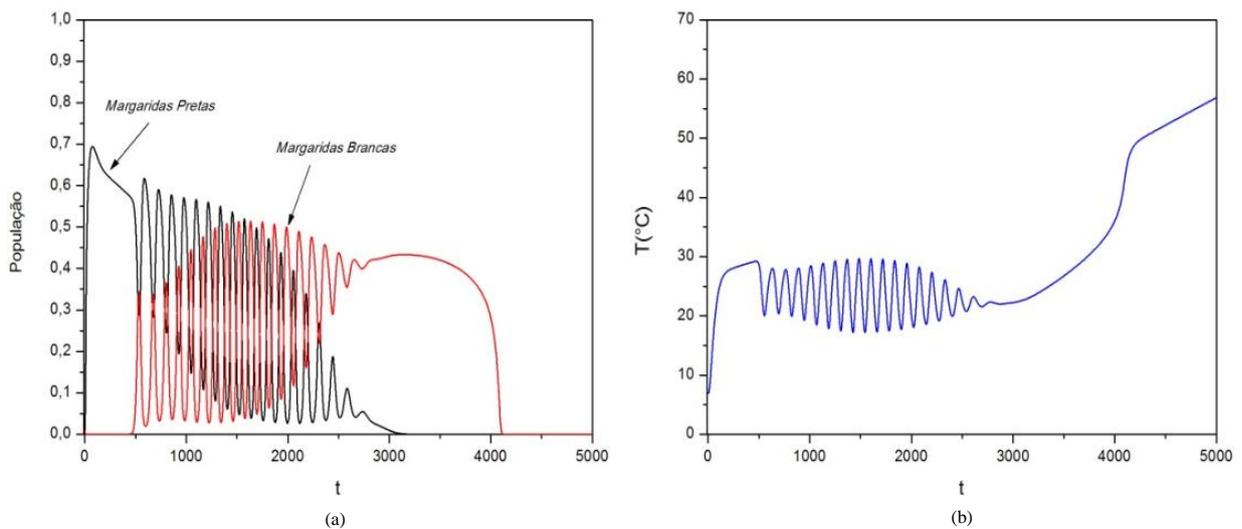


Figura 3.12: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 300 J/m^2K s$.

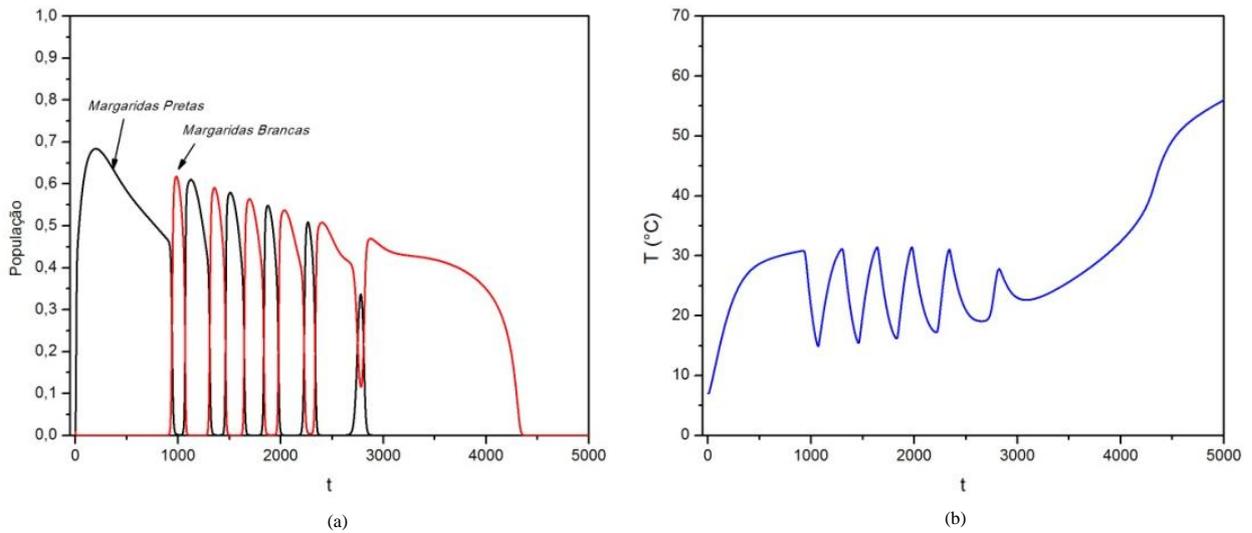


Figura 3.13: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 1000 \text{ J/m}^2\text{K s}$.

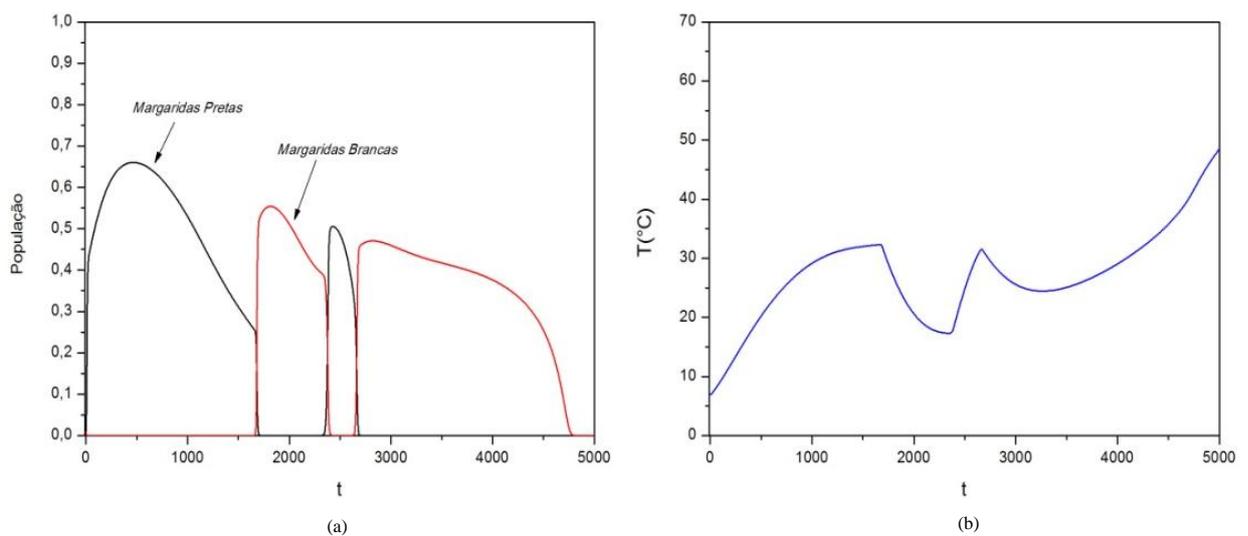


Figura 3.14: Resposta do *Daisyworld* com crescimento linear da luminosidade solar ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$; $L_0 = 0$), gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$) e $c = 3000 \text{ J/m}^2\text{K s}$.

Como descrito anteriormente, o aquecimento global é o aumento observado na temperatura média da Terra, cuja principal causa desse fenômeno é o efeito estufa relacionado aos gases estufa. Uma questão importante relacionada ao aquecimento global é a preocupação com a sua reversibilidade. Em outras palavras, é importante saber se a redução das emissões dos gases estufa é suficiente para fazer a temperatura do planeta, retornar a valores do passado.

A fim de observar este tipo de comportamento, faz-se uma simulação estabelecendo uma carga e descarga dos gases estufa, considerando a luminosidade solar constante ($\bar{L} = 0,75; L_0 = 0$) Figura 15a e 15b, e considerando um crescimento linear da luminosidade ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,0; L_0 = 0$) Figura 15c e 15d. A inércia térmica ($c = 1000 \text{ J/m}^2\text{K s}$) tende a provocar uma resposta oscilatória do sistema. Observa-se que com a luminosidade constante, devido à redução das emissões dos gases estufa a temperatura retorna ao patamar anterior e estabiliza. Com a luminosidade crescente, um tipo de resposta diferente é observado para a temperatura que está aumentando o seu valor, embora o gás e as margaridas brancas estejam estabilizados em valores constantes.

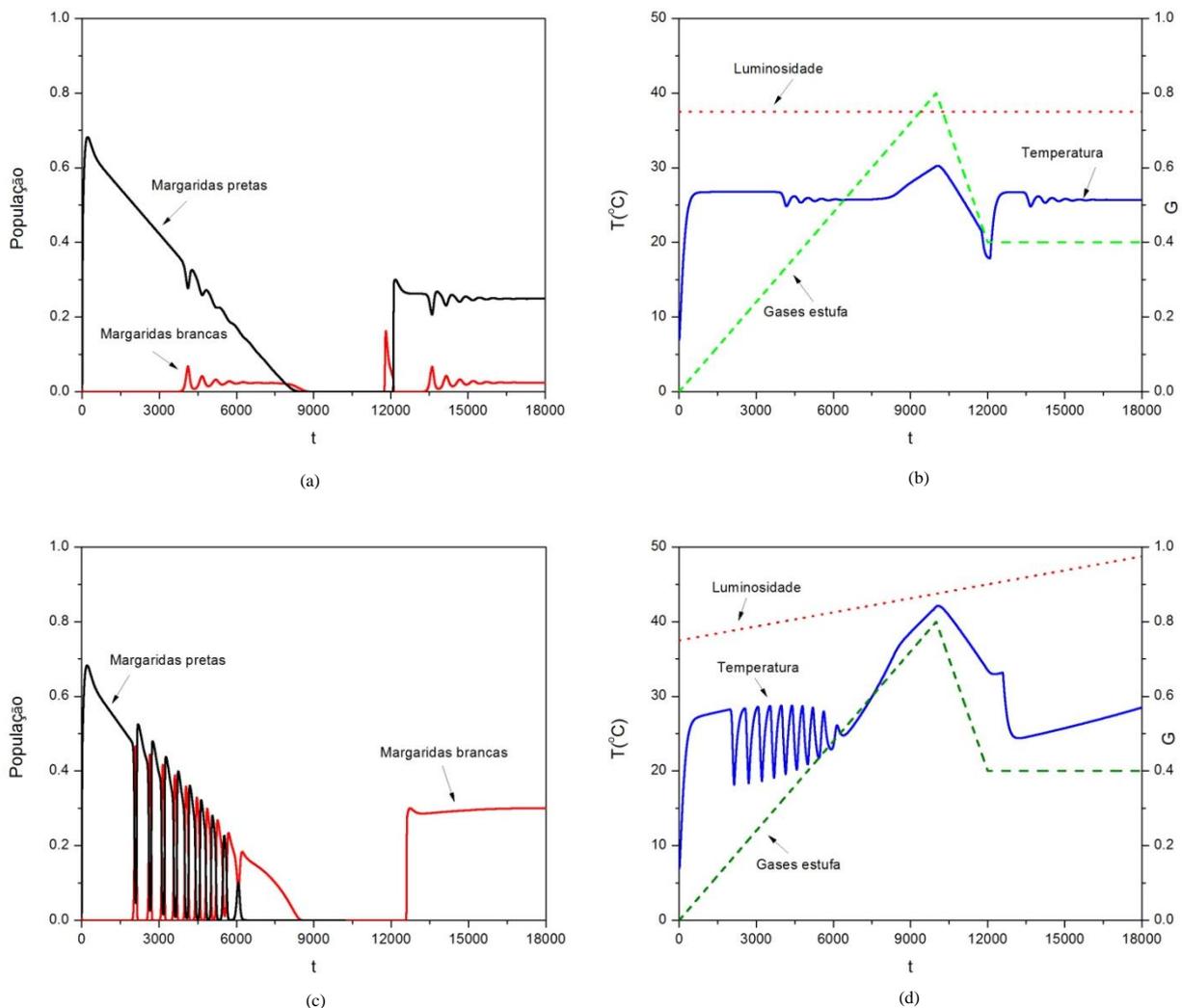


Figura 3.15: Evolução da população de margaridas (esquerda) e da temperatura (direita) com variação nas emissões dos gases estufa, considerando luminosidade constante (a,b) e crescimento linear da luminosidade (c,d).

3.4 *Daisyworld* com Variabilidade Climática

Para investigar o efeito da variabilidade climática no *Daisyworld*, assume-se a luminosidade solar com uma variação senoidal representada pela Equação (3.9). Desta forma, existe um aumento linear de luminosidade ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,7$) associado a uma variação senoidal com $L_0=0,1$ e $\omega=0,01$, conforme apresentado na Figura 3.16. Além disso, assumem-se os seguintes parâmetros: $\sigma = 1,79 \times 10^3 \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$, $S = 2,89 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$ e $c=3,0 \times 10^{13} \text{ J/m}^2\text{K}$ (10^3 anos). Neste ponto, a escala de tempo foi modificada para milhares de anos por se tratar de uma escala mais propícia para retratar a variabilidade climática. O caso com a variabilidade senoidal é comparado com o caso sem essa variabilidade, somente com aumento linear da luminosidade ($L_0=\omega=0$).

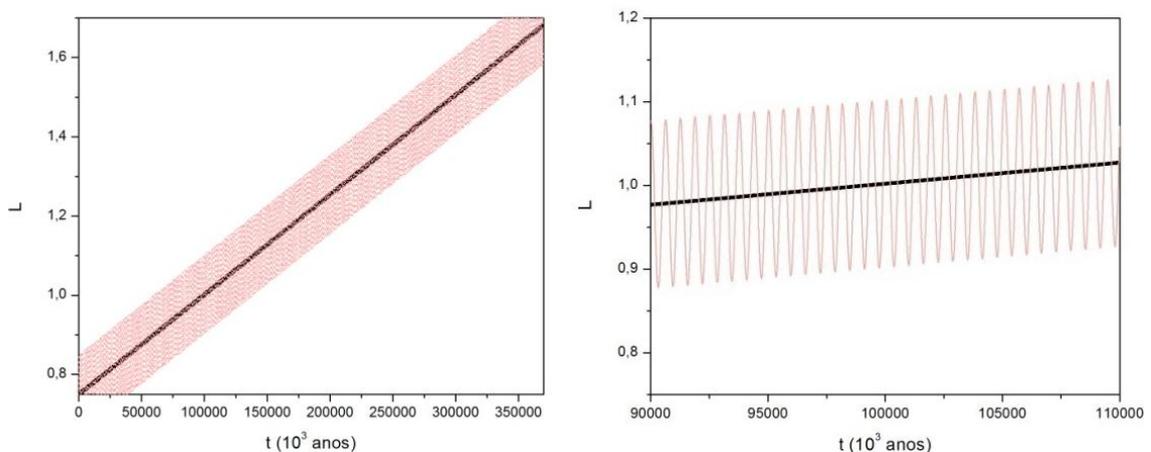


Figura 3.16: Luminosidade linear (linha escura) e variação senoidal (linha clara).

A Figura 3.17 apresenta a evolução da temperatura no *Daisyworld* mostrando a comparação entre o caso sem variabilidade senoidal (representado pela linha clara) e com a variabilidade senoidal (representado pela linha escura). O efeito dos gases estufa também é considerado. O painel esquerdo apresenta os resultados sem gases estufa enquanto o painel direito considera a situação com gases de efeito estufa.

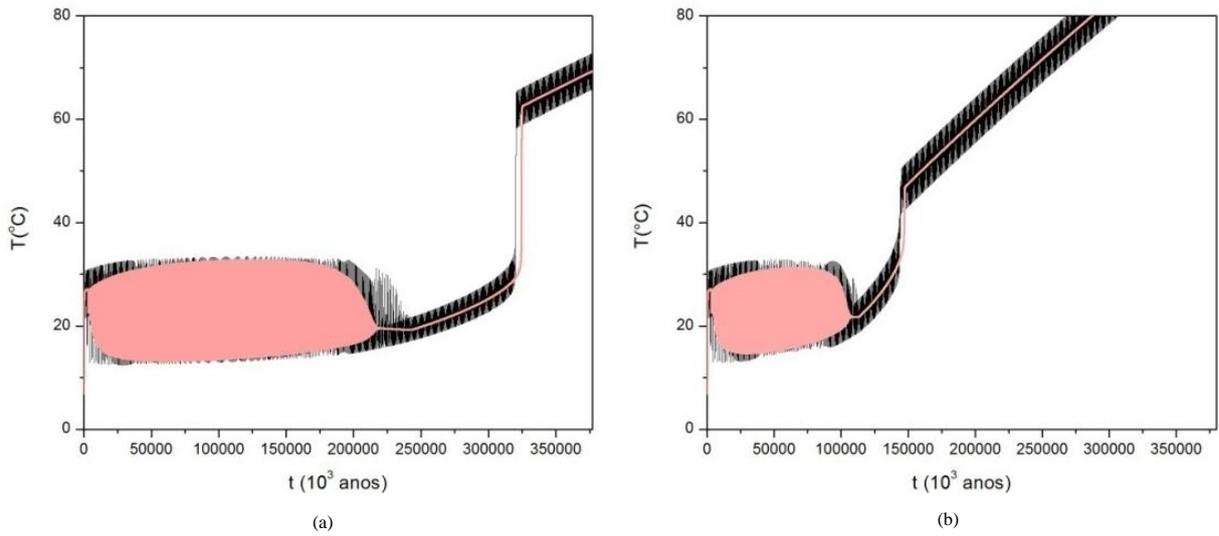


Figura 3.17: Evolução da temperatura com a luminosidade solar crescendo linearmente. $L_0=0,1$ e $\omega=0,01$ (linha escura), $L_0=0,0$ e $\omega=0,0$ (linha clara). (a) $G = 0$ (b) com gases estufa ($0,0 \leq G \leq 0,8$).

As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam a evolução das populações de margaridas. Deve ser observado que o sistema tem um comportamento irregular quando a luminosidade senoidal é considerada.

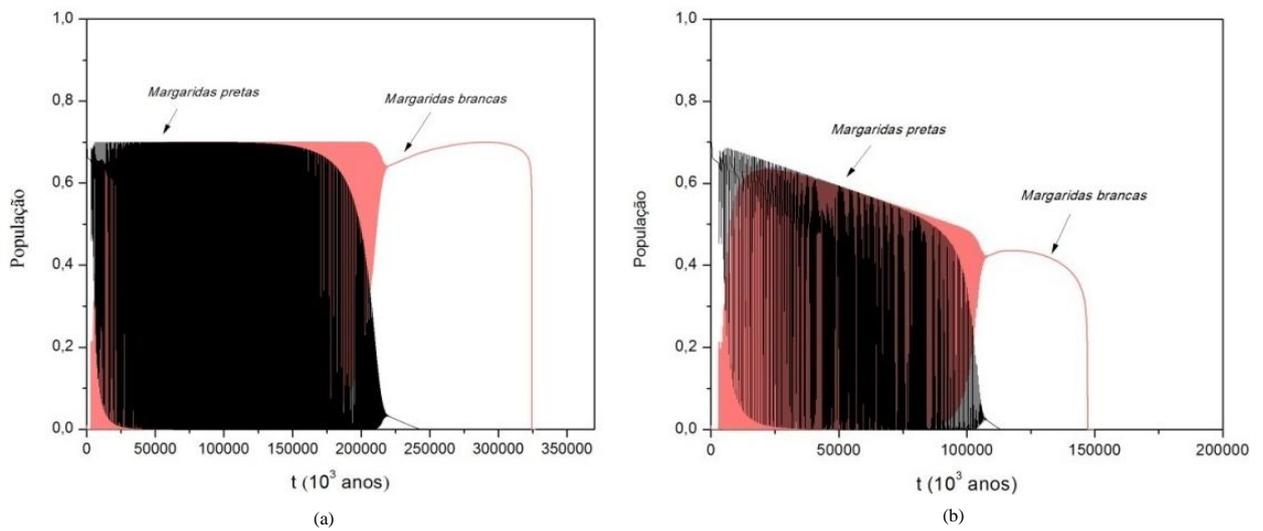


Figura 3.18: Evolução das populações de margaridas com a luminosidade solar crescendo linearmente. (a) $L_0=0,0$, $\omega=0,0$ e $G=0$; (b) $L_0=0,0$, $\omega=0,0$ e ($0,0 \leq G \leq 0,8$).

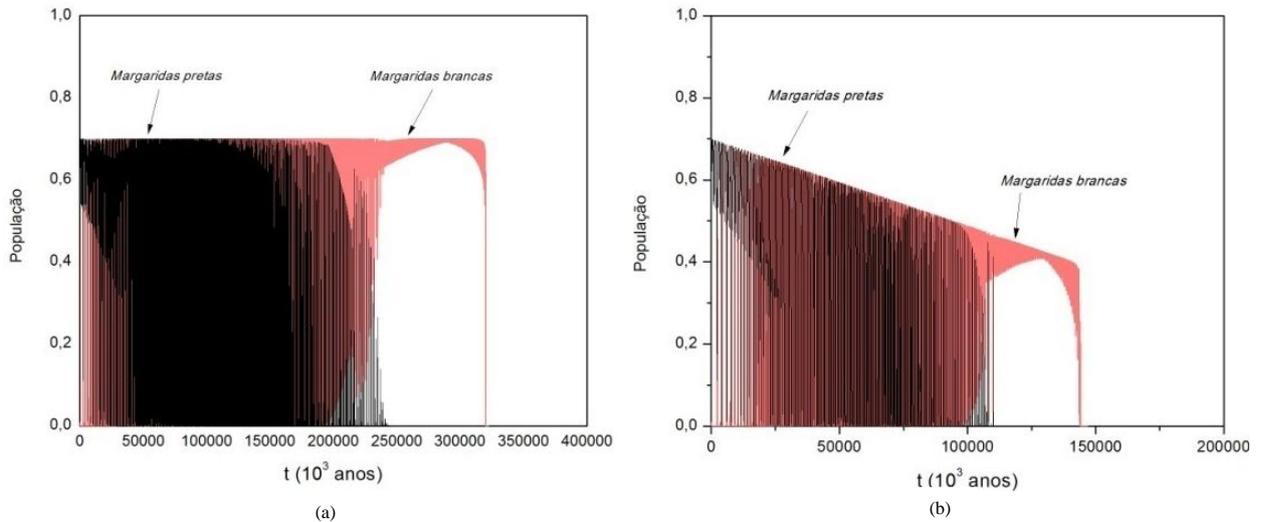


Figura 3.19: Evolução das populações de margaridas com a luminosidade solar crescendo linearmente. (a) $L_0=0,1$, $\omega=0,01$ e $G=0$; (b) $L_0=0,1$, $\omega=0,01$ e $(0,0 \leq G \leq 0,8)$.

O comportamento irregular apresentado nas simulações anteriores motiva uma investigação mais profunda da dinâmica do *Daisyworld*. O comportamento caótico do *Daisyworld* foi abordado em diferentes referências discutidas por Wood *et al.* (2008). No entanto, não existe um consenso sobre a possibilidade do *Daisyworld* apresentar o caos. A partir de agora, passa-se a identificar a influência de alguns parâmetros na dinâmica do sistema. A análise se inicia com o diagrama de bifurcação, que apresenta a distribuição estroboscópica da resposta do sistema, representada pela temperatura, a partir de um lento aumento quasi-estático da luminosidade. Esse diagrama representa a influência do parâmetro na dinâmica do sistema, mostrando o comportamento global e os efeitos de sua variação. Inicialmente, assume-se que $G=0,21052$, $L_0=0,1$, $\omega=0,01$ e a luminosidade \bar{L} varia entre 0,75 e 1,2. A Figura 3.20 apresenta esse diagrama de bifurcação que mostra regiões relacionadas a pontos discretos, bem como regiões associadas com nuvem de pontos.

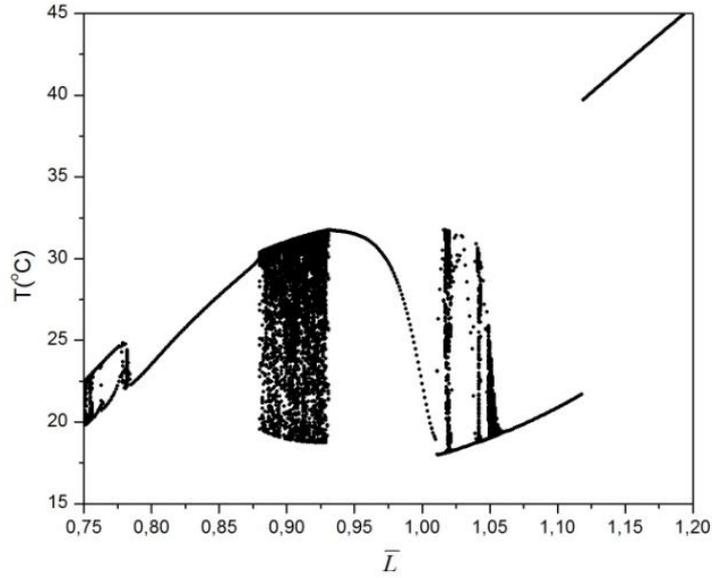


Figura 3.20: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} ($0,75 \leq \bar{L} \leq 1,20$) com $\omega = 0,01$.

Com a finalidade de avaliar a influência de outros parâmetros, diferentes diagramas de bifurcação são gerados, para diferentes parâmetros constantes. A influência do parâmetro da frequência ω pode ser avaliada considerando outro diagrama de bifurcação apresentado na Figura 3.21 para os seguintes valores da frequência: $\omega = 0,05$ e $\omega=0,1$. Observa-se que esta mudança pode alterar dramaticamente a dinâmica do sistema.

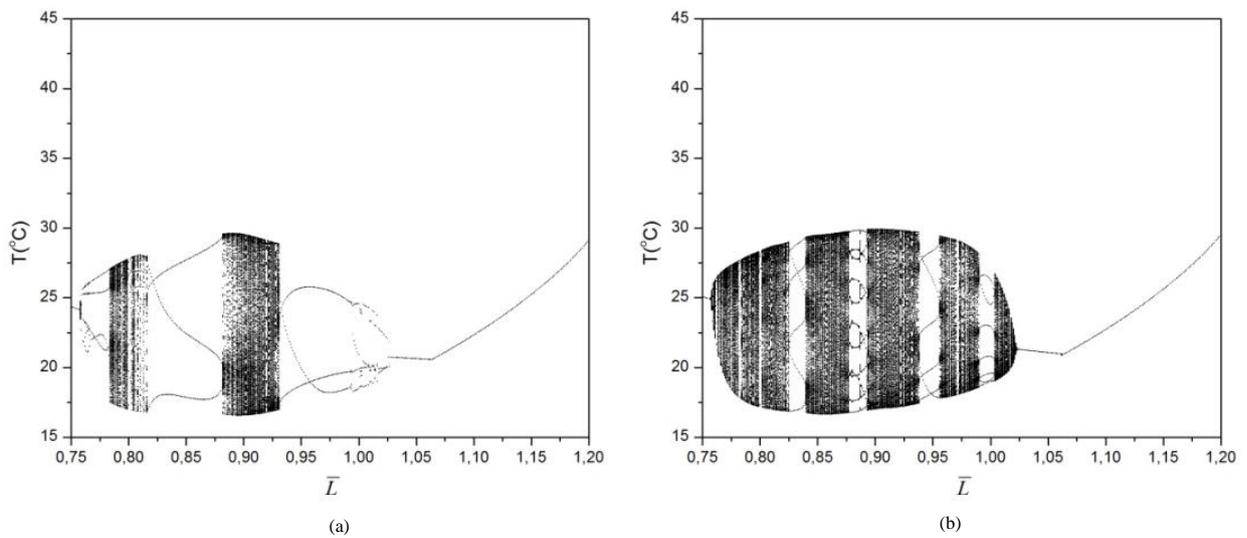


Figura 3.21: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $\omega=0,05$ e (b) $\omega=0,1$.

A influência do parâmetro de amplitude L_0 é mostrado na Figura 3.22 assumindo os seguintes valores: $L_0 = 0,1$ e $L_0 = 2,0$. Mais uma vez, é evidente que a alteração deste parâmetro pode alterar dramaticamente a dinâmica do sistema.

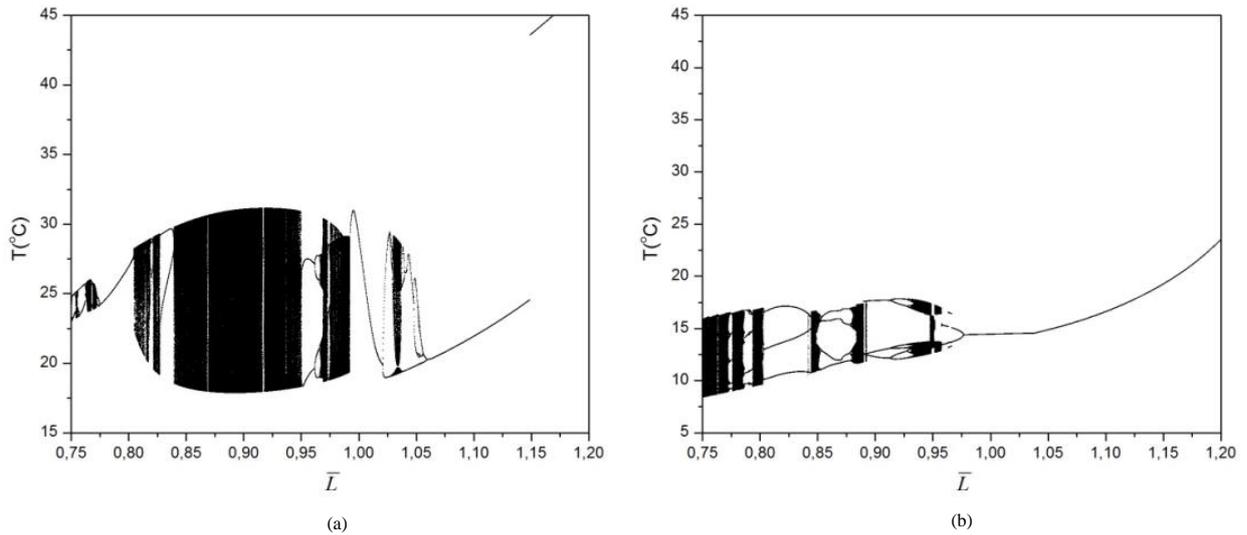


Figura 3.22: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $L_0=0,05$, e (b) $L_0=2,0$.

Gases de efeito estufa também influenciam a dinâmica do sistema. A Figura 3.23 avalia essa influência, assumindo diferentes valores para G ($G = 0,31$ e $G = 0,46$). Sob essas condições, o sistema tende a ser mais regular, acelerando o fim do equilíbrio entre a vida e o ambiente.

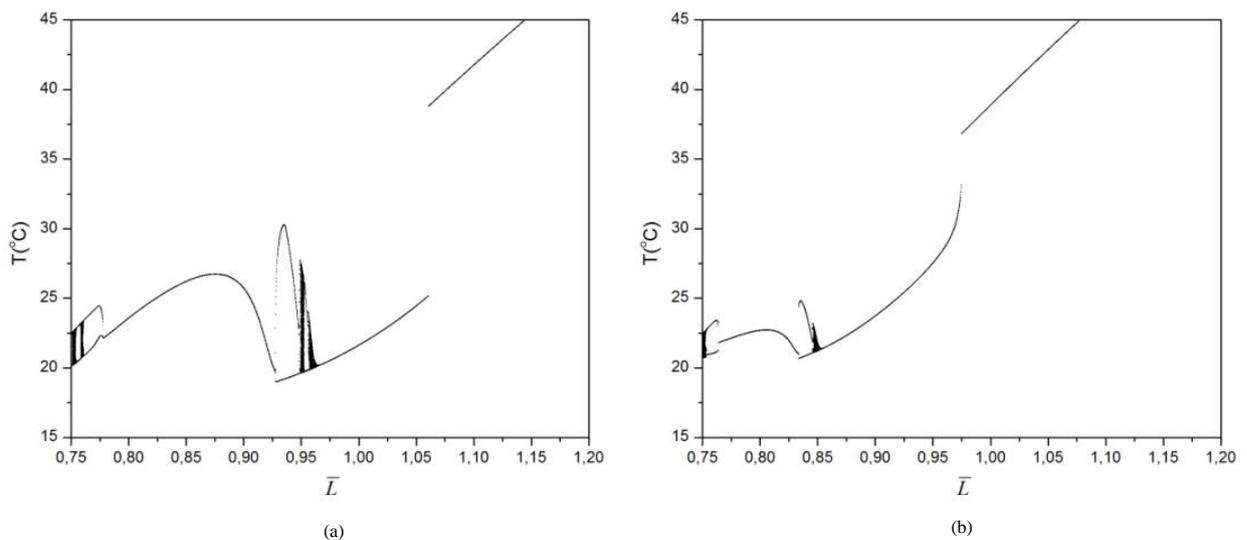


Figura 3.23: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} : (a) $G=0,31$ e (b) $G=0,46$.

Neste ponto os detalhes da dinâmica do sistema passam a ser o foco do trabalho. Para isso, considera-se o diagrama de bifurcação apresentado na Figura 3.20. A Figura 3.24 apresenta detalhes expandidos do diagrama de bifurcação para diferentes faixas de luminosidade. Nota-se que bifurcações e caos estão presumivelmente presentes na dinâmica do *Daisyworld*.

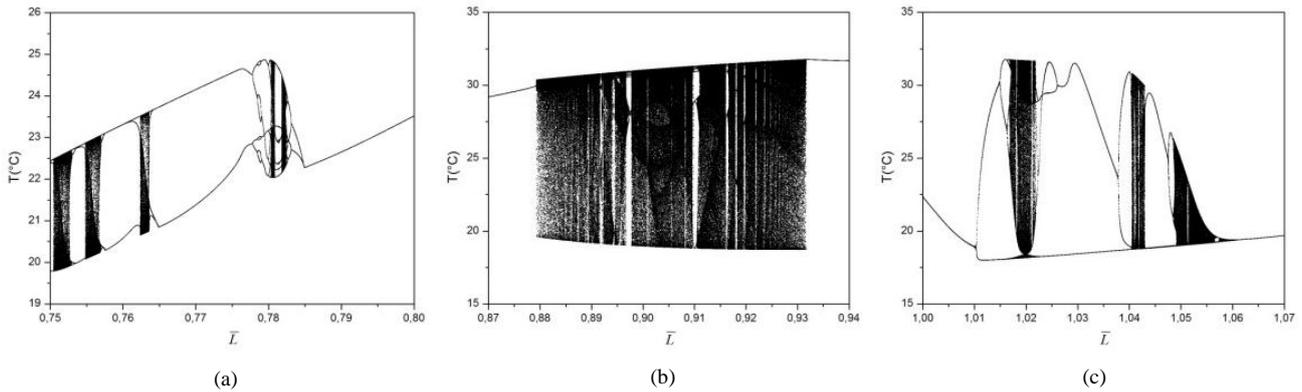


Figura 3.24: Diagrama de bifurcação variando \bar{L} . (a) $0,75 \leq \bar{L} \leq 0,80$; (b) $0,87 \leq \bar{L} \leq 0,94$ e (c) $1,00 \leq \bar{L} \leq 1,07$.

As Figuras 3.25 a 3.39 mostram alguns detalhes do comportamento do *Daisyworld*. No painel esquerdo dessas figuras apresentam-se os espaços de fase e as seções de Poincaré (pontos em vermelho) de cada uma das respostas, enquanto no painel direito são apresentadas as mesmas respostas na forma da série temporal.

A Figura 3.25 mostra uma resposta de período-2 para $\bar{L} = 0,76$ que é seguido por um comportamento caótico, quando $\bar{L} = 0,7629$ (Figura 3.26).

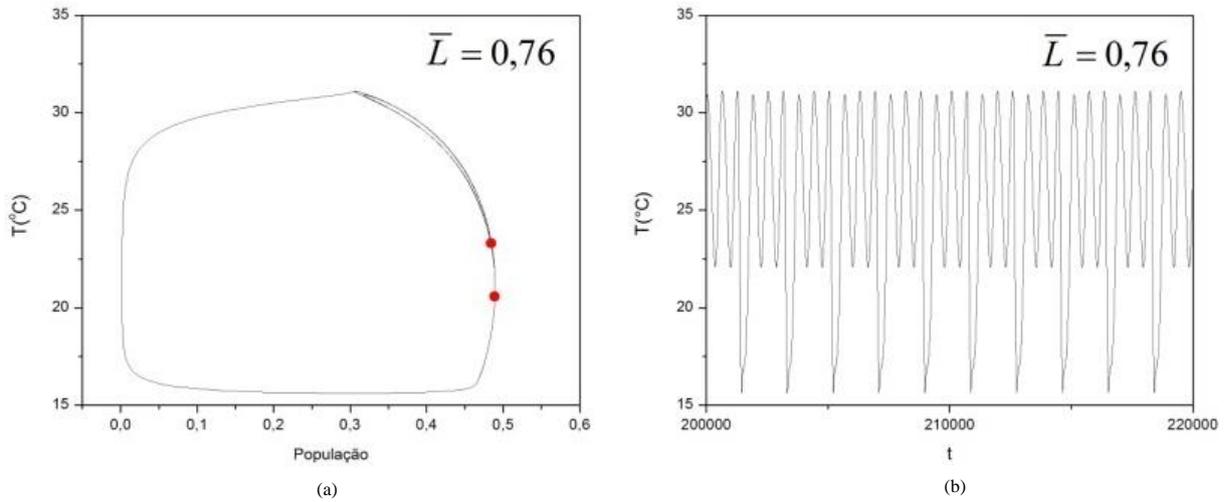


Figura 3.25: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,76$.

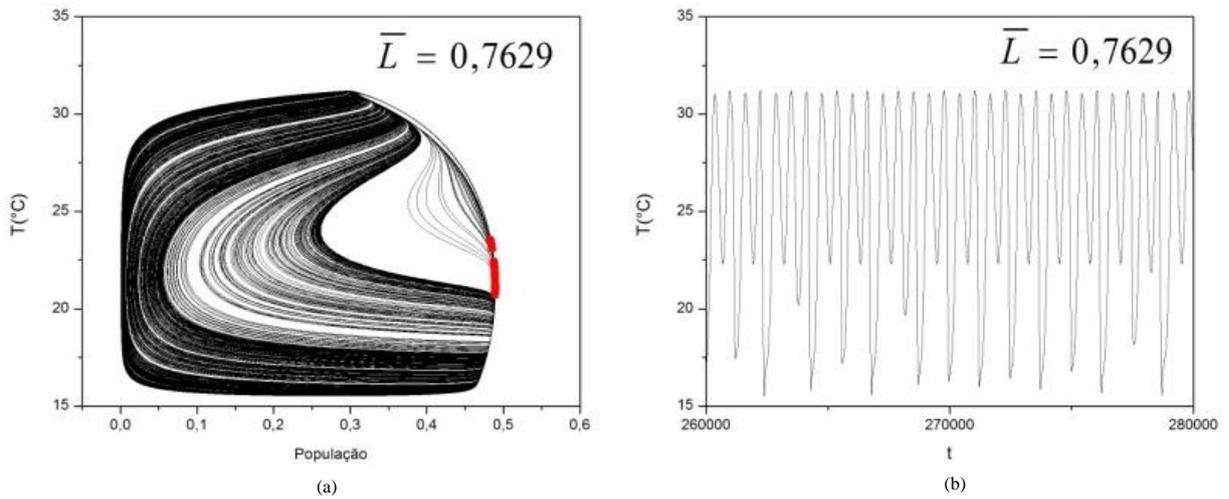


Figura 3.26: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,7629$.

Para o valor de $\bar{L} = 0,7787$ (Figura 3.27), o sistema apresenta uma resposta de período-8. A seguir é apresentado um período-4 quando $\bar{L} = 0,78$ (Figura 3.28).

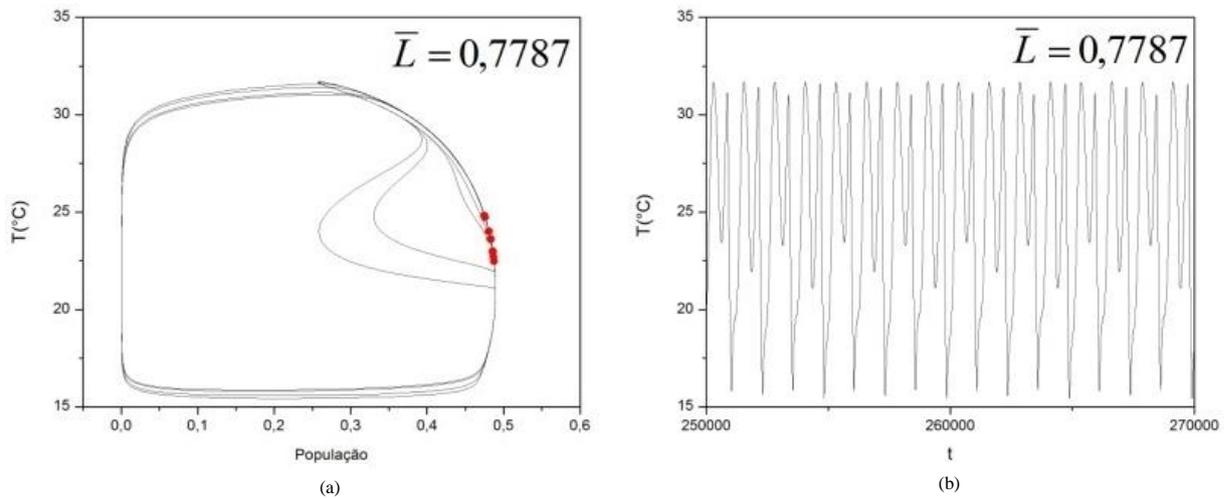


Figura 3.27: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,7787$.

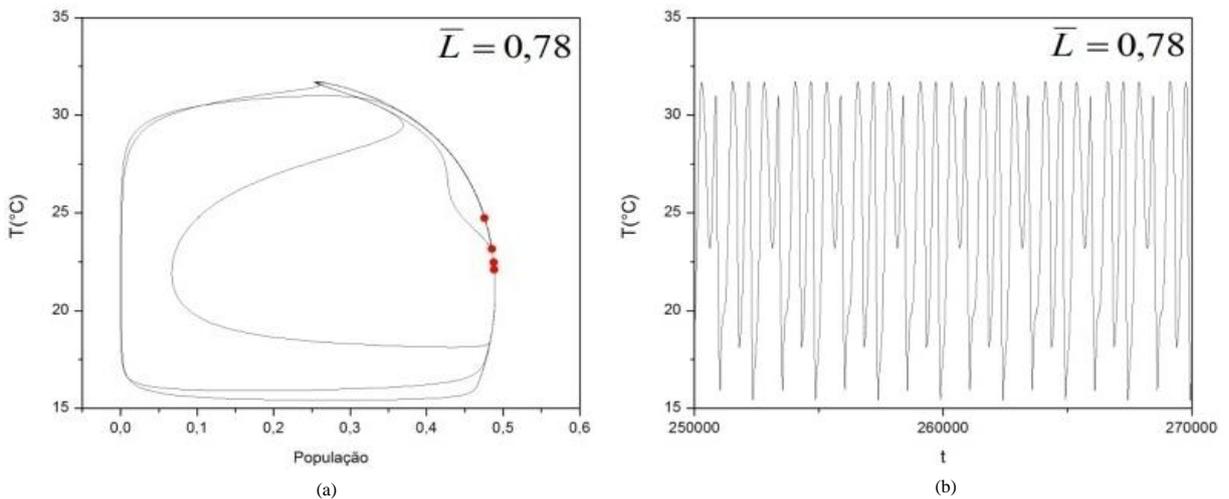


Figura 3.28: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=0,78$.

O aumento da luminosidade para $\bar{L} = 0,782$ induz uma nova resposta caótica (Figura 3.29). Uma sequência de bifurcações ocorre até $\bar{L} = 0,785$ quando aparece uma resposta de período-1. Na região entre 0,88 e 0,93, um comportamento quasi-periódico emerge quando $\bar{L} = 0,88$ (Figura 3.30) e $\bar{L} = 0,90$ (Figura 3.31).

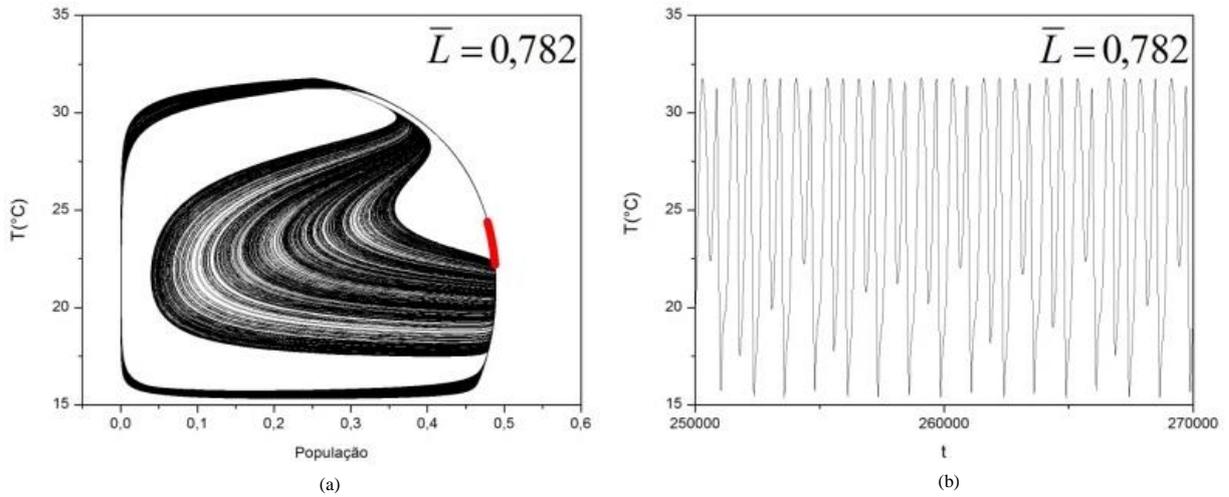


Figura 3.29: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,782$.

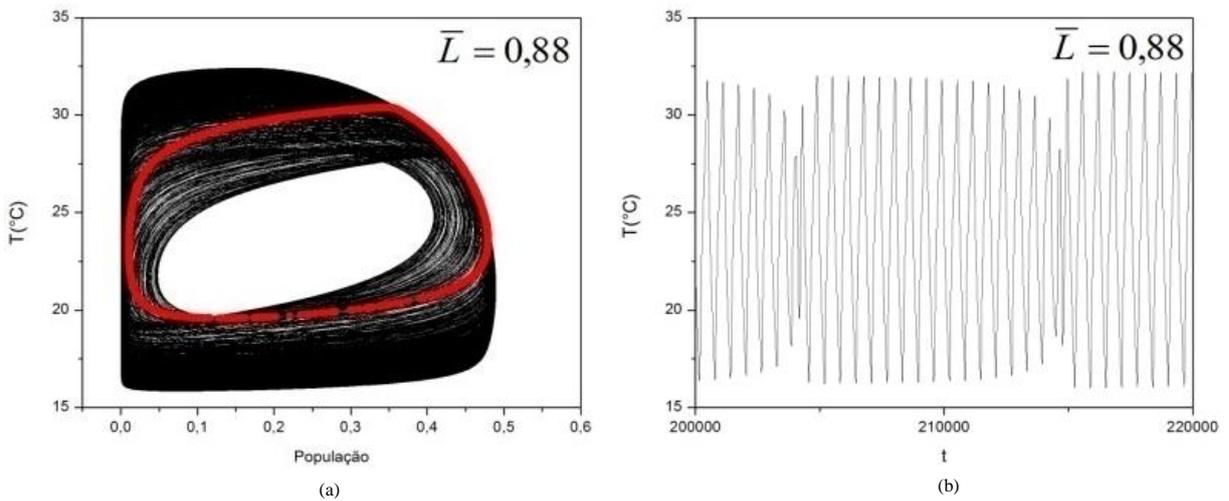


Figura 3.30: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,88$.

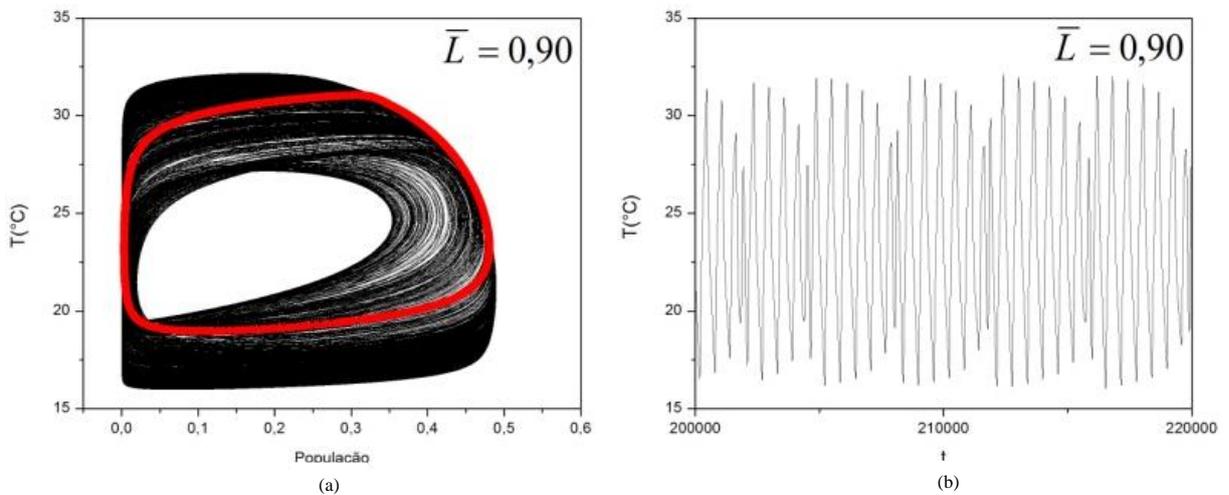


Figura 3.31: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,90$.

Janelas periódicas também estão presentes nesta região como pode ser observado para o período-3, $\bar{L} = 0,9082$ (Figura 3.32) e período-7, $\bar{L} = 0,9097$ (Figura 3.33).

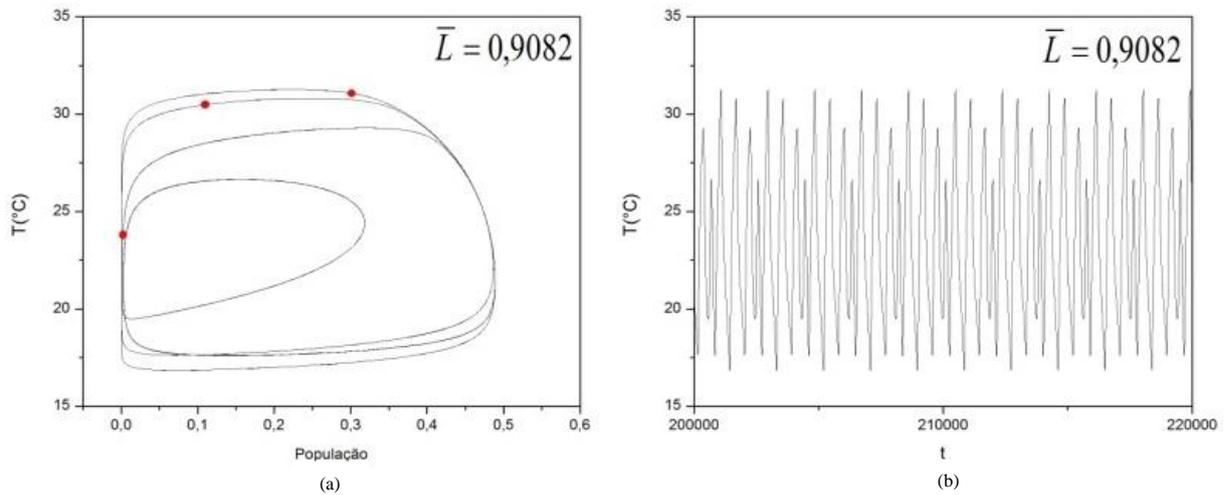


Figura 3.32: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,9082$.

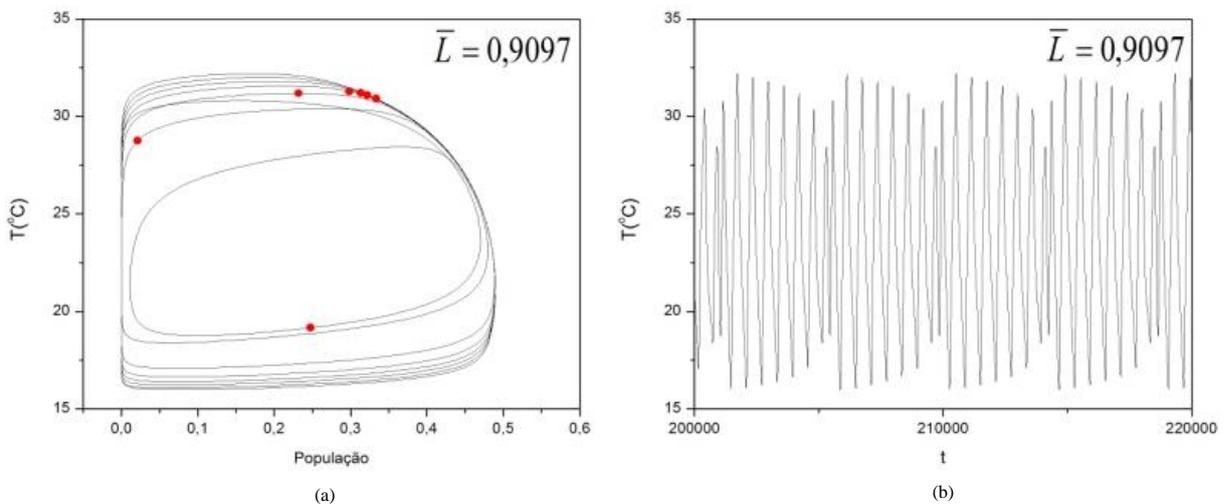


Figura 3.33: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,9097$.

Posteriormente, o comportamento caótico ocorre novamente, como pode ser observado para $\bar{L} = 0,919$ (Figura 3.34) e $\bar{L} = 0,9238$ (Figura 3.35).

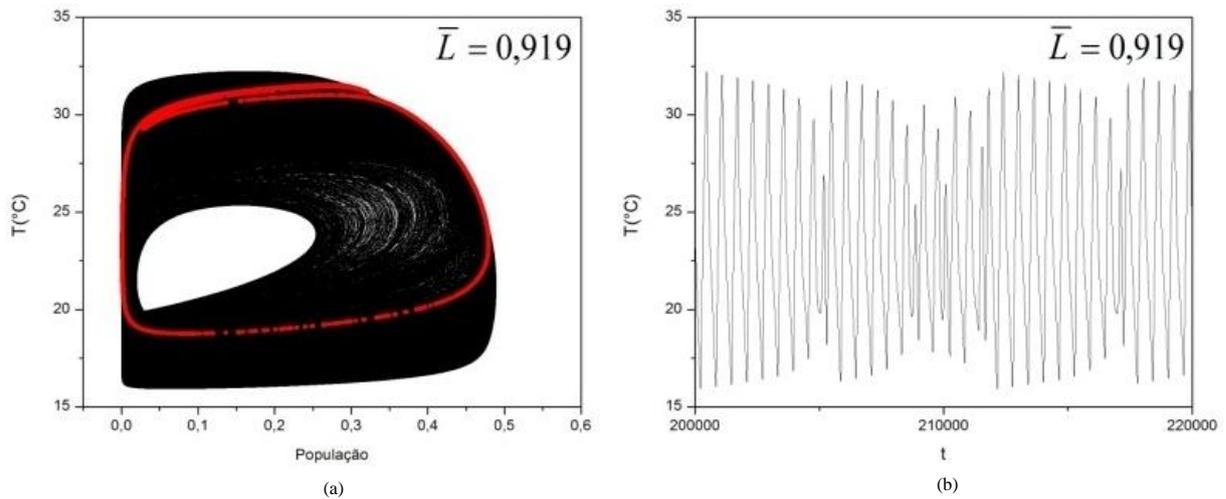


Figura 3.34: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,919$.

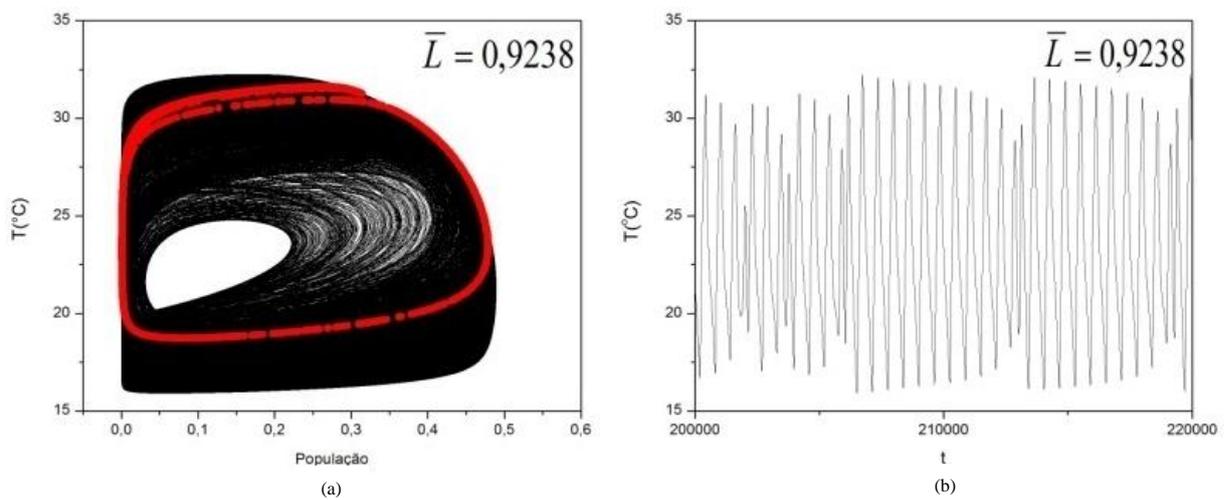


Figura 3.35: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 0,9238$.

No intervalo entre 0,9238 e 1,01 o sistema apresenta novas bifurcações. Para $\bar{L} = 1,01$ ocorre uma resposta de período-1 (Figura 3.36). Algumas bifurcações causam um aumento da periodicidade do sistema atingindo um regime caótico para $\bar{L} = 1,02$ (Figura 3.37). Para $\bar{L} = 1,04$ ocorre uma resposta de período-3 (Figura 3.38).

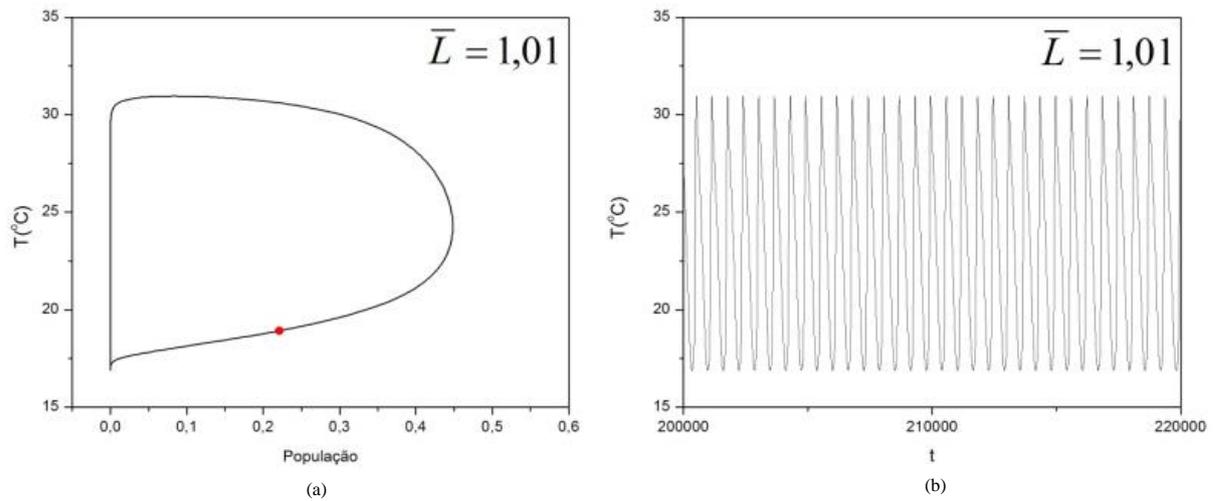


Figura 3.36: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 1,01$.

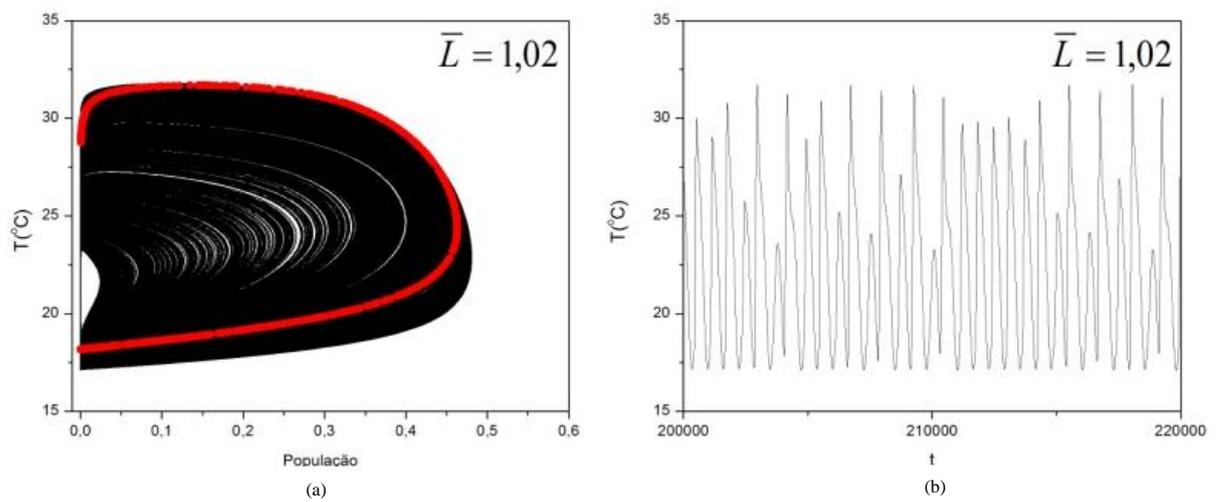


Figura 3.37: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 1,02$.

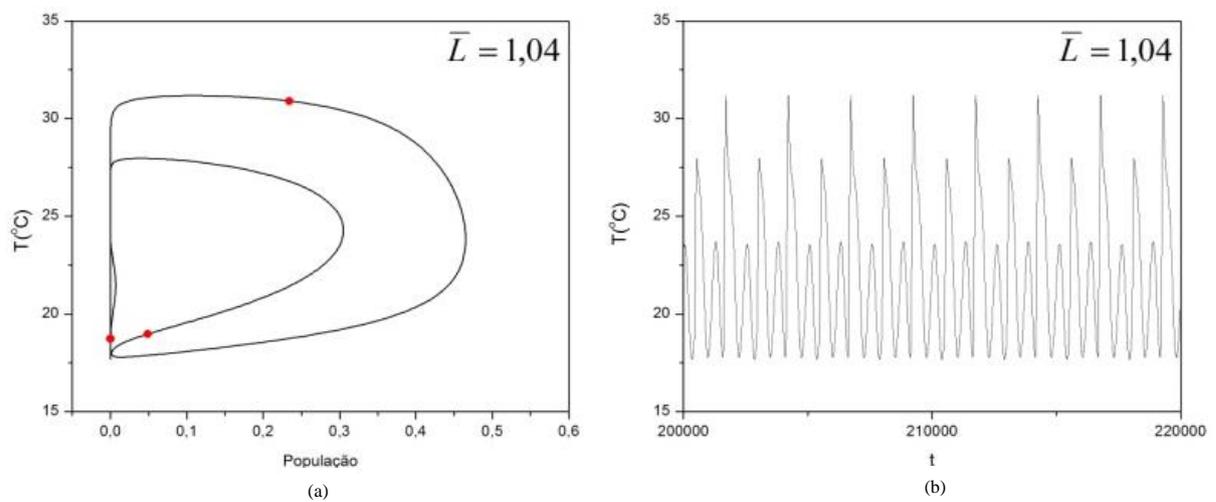


Figura 3.38: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L} = 1,04$.

A seguir uma resposta caótica ocorre novamente para $\bar{L} = 1,05$ (Figura 3.39). Para valores maiores do que 1,06 o sistema apresenta uma resposta de período-1.

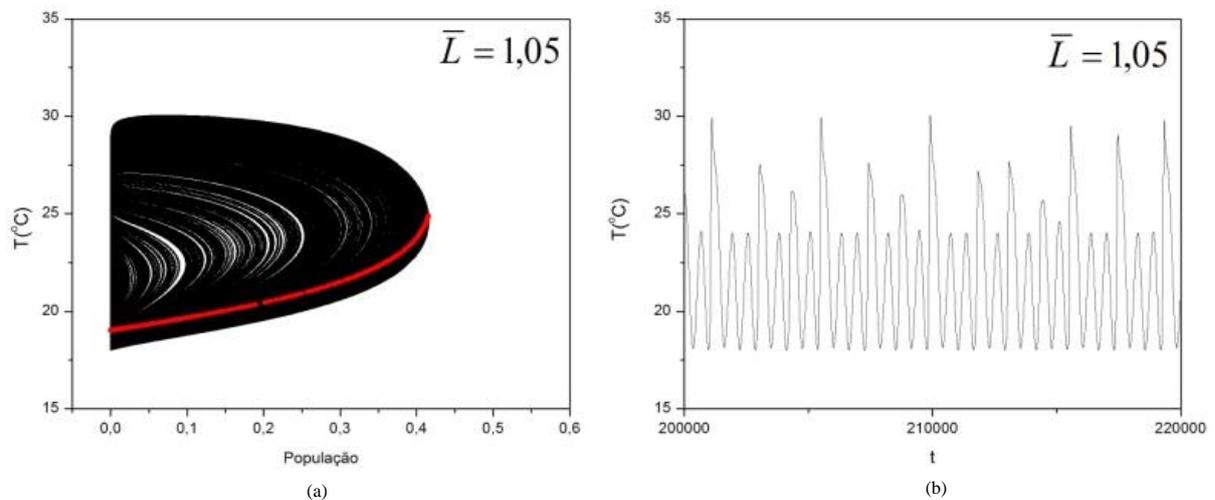


Figura 3.39: Espaço de fase e seção de Poincaré (a) e evolução da temperatura (b), para $\bar{L}=1,05$.

Observando os diagramas de bifurcação (Figura 3.24) e as seções de Poincaré (Figura 3.25-3.39) é possível identificar a presença de um comportamento aparentemente caótico no sistema. No entanto, a definição deste tipo de comportamento tem que ser comprovada a partir da análise de alguma ferramenta de diagnóstico. Com o propósito de comprovar esse comportamento aplica-se o cálculo do expoente de Lyapunov.

O expoente de Lyapunov é um invariante do sistema que avalia a sua sensibilidade às suas condições iniciais, estimando uma taxa de divergência local entre trajetórias vizinhas. Savi (2006) descreve alguns algoritmos clássicos para o cálculo do expoente de Lyapunov onde se destaca o algoritmo proposto por Kantz (1994) que se baseia na idéia de que as distâncias entre duas trajetórias aumentam com uma taxa dada pelo maior expoente de Lyapunov. Essa taxa de divergência das trajetórias oscila ao longo do tempo, quando medida em torno da direção de instabilidade. O algoritmo de Kantz, calcula as distâncias entre a trajetória de referência e as trajetórias vizinhas, durante um tempo relativo (δ). Em seguida aplica um logaritmo sobre as médias dessas distâncias definindo a curva $S(\delta)$. O cálculo do maior expoente é feito então a

partir da curva $S(\delta)$ ao longo do tempo (δ). Através da inclinação da reta, calculada entre o valor inicial e o ponto no qual a curva $S(\delta)$ apresenta uma tendência horizontal, é possível extrair o valor do maior expoente de Lyapunov (λ), definindo a instabilidade local do sistema. Uma inclinação positiva ($\lambda > 0$) indica a ocorrência de caos e a inclinação nula ($\lambda = 0$) indica um comportamento periódico. Franca & Savi (2001 e 2003) mostram que o método de Kantz é adequado para mapas e portanto apresentam melhores resultados a partir das séries da seção de Poincaré. Portanto, o expoente é calculado a partir das séries geradas pela seção de Poincaré.

As Figuras 3.40a, 3.41a e 3.42a apresentam uma expansão das Figuras 3.27a, 3.35a e 3.39a e as Figuras 3.40b, 3.41b e 3.42b apresentam as respectivas estimativas do expoente do expoente de Lyapunov mostrando as características gerais desses comportamentos. A Figura 3.40b apresenta o resultado do cálculo do expoente de Lyapunov para uma série de período-8, que tem como característica uma reta com inclinação igual a zero e portanto, possui o maior expoente nulo ($\lambda=0$). Isso comprova o comportamento periódico dessa reposta.

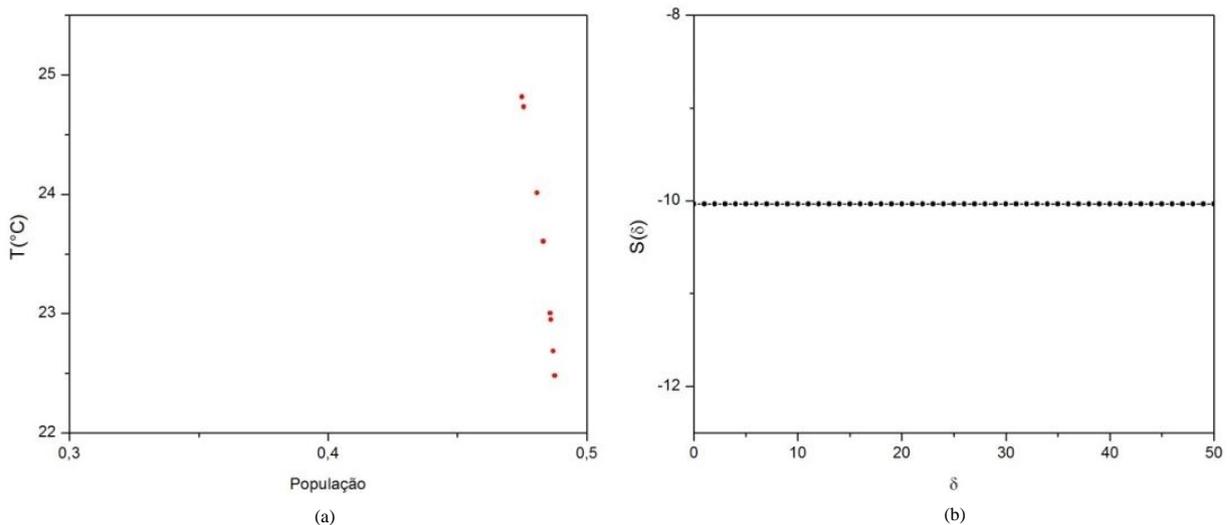


Figura 3.40: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.27.

As Figuras 3.41b e 3.42b apresentam os expoentes de Lyapunov tendo como característica uma reta com inclinação positiva ($\lambda=0,28$ e $\lambda=0,36$, respectivamente). Desta forma, tem-se que o máximo expoente de Lyapunov é positivo para os dois casos, representando uma instabilidade local do sistema associada ao caos. Com isso, pode-se dizer que o modelo *Daisyworld* apresenta um comportamento caótico. Este resultado é extremamente importante, podendo estar relacionado a instabilidade do sistema climático.

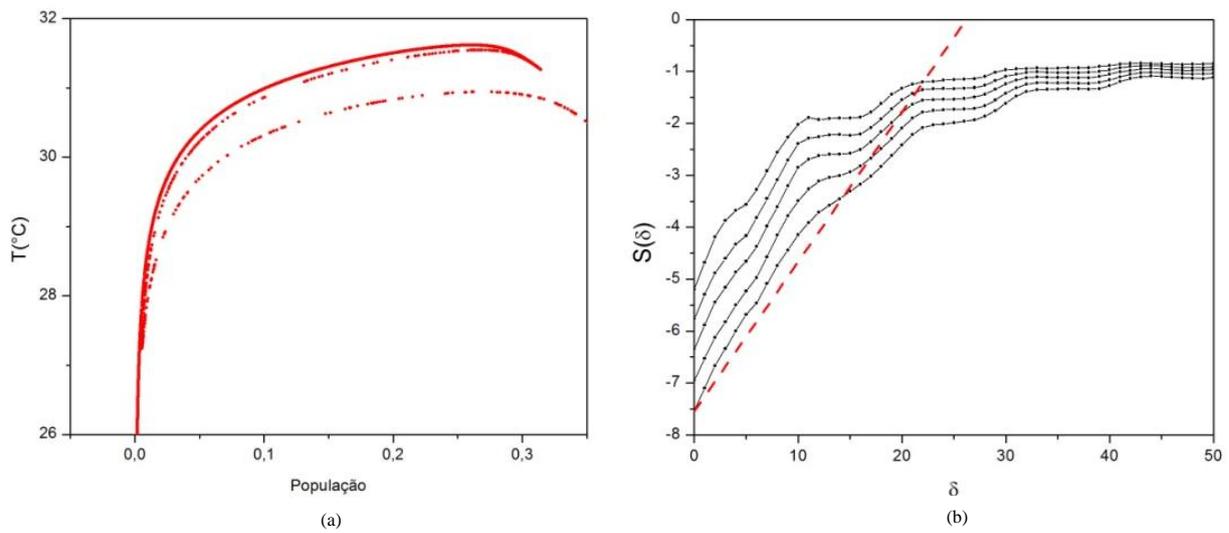


Figura 3.41: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.35.

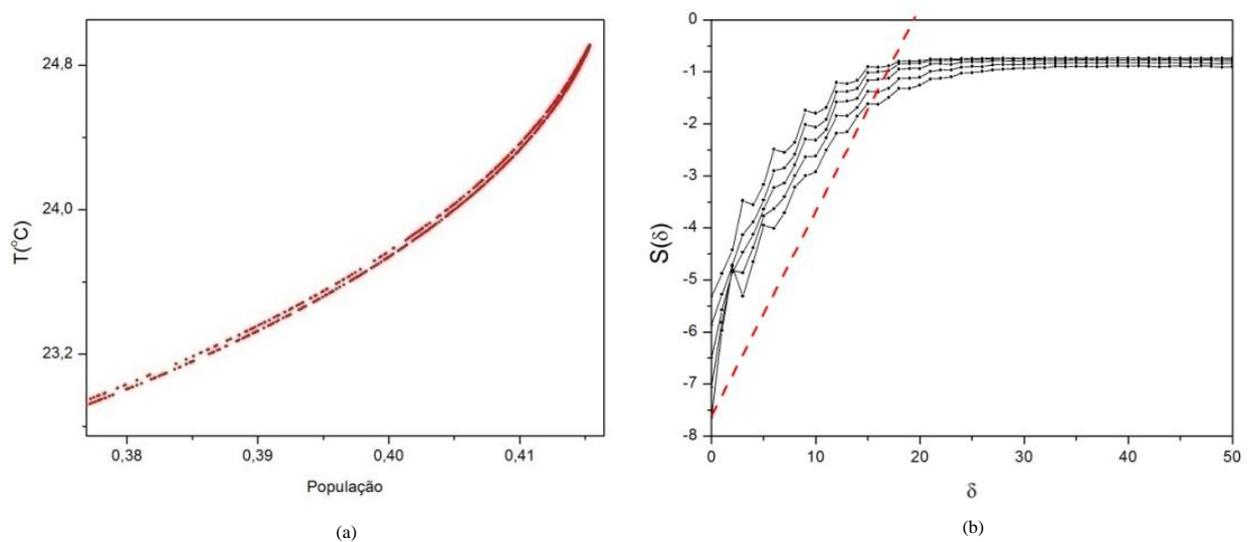


Figura 3.42: Detalhes da seção de Poincaré (a) e expoente de Lyapunov (b) da figuras 3.39.

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise da dinâmica do aquecimento global segundo duas abordagens: análise de séries temporais não-lineares e modelagem matemática.

A análise de séries temporais considera as séries de temperatura de Montreal (Canadá), Los Angeles (EUA), Rio de Janeiro (Brasil), Londres (Reino Unido), Johannesburgo (África do Sul), Pequim (China), Tóquio (Japão) e Albany (Austrália) que são analisadas com a finalidade de estabelecer um modelo para a predição.

A reconstrução do espaço de estado é realizada usando o Método das Coordenadas Defasadas e os parâmetros de defasagem, tempo de defasagem e dimensão de imersão, são calculados, respectivamente, pelo Método da Informação Mútua Média e o Método dos Falsos Vizinhos Próximos. A predição é realizada utilizando a técnica de predição não-linear simples.

Séries temporais com diferentes quantidades de pontos foram empregadas para a verificação do modelo. Os resultados mostram que este método captura bem o comportamento geral das séries temporais. O valor médio da predição e o valor médio da série temporal real são muito próximos, com diferenças menores que 6%. Além disso, mais de 50% das predições diárias apresentam erros inferiores a 10%. Após essa verificação, o procedimento é utilizado para estabelecer a predição de valores futuros.

Com base nesses resultados, uma predição de 20 anos é realizada para avaliar o comportamento da temperatura até 2028 para cada série temporal. Através de uma regressão linear aplicada às predições percebe-se o seguinte crescimento das temperaturas: $0,72^{\circ}\text{C}$ em Montreal (Canadá), $0,22^{\circ}\text{C}$ em Los Angeles (EUA), $0,30^{\circ}\text{C}$ em Rio de Janeiro (Brasil), $0,28^{\circ}\text{C}$ em Londres (Reino Unido), $0,28^{\circ}\text{C}$ em Johannesburgo (África do Sul), $0,39^{\circ}\text{C}$ em Pequim (China) e $0,38^{\circ}\text{C}$ em Tóquio (Japão). Somente Albany (Austrália) apresentou uma tendência de redução da temperatura de $0,24^{\circ}\text{C}$. Estes resultados mostram que a temperatura média tem um

aumento de 0,29°C, para os próximos 20 anos. Esses valores estão coerentes às perspectivas discutidas na literatura.

Pode-se perceber que as ferramentas não-lineares empregadas neste trabalho podem ser úteis para a análise do aquecimento global.

A segunda abordagem para análise do aquecimento global é a modelagem matemática. O modelo *Daisyworld* é um arquétipo da Terra com capacidade para descrever a regulação global do planeta a partir da interação entre a vida e o ambiente. A vida é representada pela população de margaridas pretas e brancas, enquanto o ambiente é representado pela temperatura. Uma variável adicional relacionada com os gases estufa foi incorporada ao modelo, permitindo a análise do aquecimento global. Além disso, a equação de energia foi considerada, a fim de investigar fenômenos transientes relacionados à variação de temperatura. Uma análise mais geral do *Daisyworld* foi realizada considerando a luminosidade solar constante e aumentando linearmente. Depois, a influência de gases de efeito estufa na dinâmica do *Daisyworld* foi tratada, estabelecendo uma comparação com o modelo clássico. Em geral, esses gases tendem a aumentar a temperatura do planeta, acelerando a morte das populações e diminuindo a capacidade de regulação global. Outro ponto importante é em relação à reversibilidade do fenômeno do aquecimento global. Simulações mostraram que mesmo a partir da redução e estabilização das emissões de gases de efeito estufa, a temperatura voltou a aumentar o seu valor, em função do aumento da luminosidade embora o gás e as margaridas brancas tenham permanecido estabilizados em valores constantes. A inércia global do planeta também foi considerada, mostrando sua influência na resposta do sistema. A variabilidade climática é descrita considerando uma variação senoidal da luminosidade solar. Os resultados referentes à variabilidade climática mostraram padrão irregular, estando associada com a riqueza de respostas que incluem comportamentos periódicos, quasi-periódicos e caóticos. Além disso, deve-se destacar que as respostas são altamente dependentes dos parâmetros. Os expoentes de Lyapunov

foram utilizados para comprovar a caoticidade do *Daisyworld*, o que é um resultado relevante deste trabalho.

Traçando um paralelo entre a análise das séries reais de temperatura de determinados locais do planeta (capítulo 2) e as séries geradas pelo modelo é possível perceber que as ferramentas utilizadas possibilitam tanto uma análise local como global do fenômeno. Essa é uma característica importante do modelo *Daisyworld* que permite contemplar tanto análises locais quanto globais.

Acredita-se que as análises realizadas neste trabalho podem ser utilizadas para uma descrição qualitativa do fenômeno do aquecimento global. A perspectiva dinâmica permite a avaliação de diferentes cenários, possibilitando então verificar esses diversos cenários de um problema essencial do nosso século.

A partir deste trabalho acredita-se que as ferramentas aqui apresentadas podem ser utilizadas em diferentes contextos. Uma questão importante é calibrar o modelo *Daisyworld* para descrever as séries experimentais. Além disso, uma análise das séries com foco nas temperaturas mínimas e máximas pode permitir importantes observações sobre eventos extremos ocorridos no período disponível das séries.

Outra linha de estudo, envolve a dinâmica espaço-temporal a partir das duas abordagens. No que diz respeito a séries temporais é importante destacar que o aquecimento global deve ser tratado como um fenômeno espaço-temporal, considerando a temperatura média de toda a superfície da Terra. Este aspecto deve ser tratado com critério, sendo analisado a partir de técnicas apropriadas e que serão objetos de investigações futuras. A idéia inicial é dividir a Terra em sub-regiões, por exemplo, como uma matriz de 36 linhas e 72 colunas. Em seguida aplicar técnicas de análise espaço-temporais, levando em consideração a influência que uma sub-região pode exercer sobre uma sub-região vizinha.

O modelo *Daisyworld* também pode ser usado com este objetivo, propondo ou uma equação diferencial parcial que inclua a variação espacial ou criando um acoplamento entre diferentes populações espalhadas pelo planeta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarbanel, H. D. I. (1995), "Tools for analyzing observed chaotic data", In Guran, A. & Inman, D. J., editors, *Smart Structures, Nonlinear Dynamics, and Control*, Prentice Hall, U.S.A., pp.1-86.
- Ackland, G.J., Clark, M.A. & Lenton, T.M., (2003), "Catastrophic desert formation in Daisyworld", *Journal of Theoretical Biology*, v.223, pp.39-44.
- Adams, B., Carr J., Lenton T. M. & White A. (2003), "One-dimensional Daisyworld: Spatial interactions and pattern formation", *Journal of Theoretical Biology*, v.223, pp.505-513.
- Aguirre, L.A., (2007), "Introdução à identificação de sistemas", Editora UFMG, Brasil.
- Aguirre, L.A. & Lettelier, C., (2009), "Modeling nonlinear dynamics and chaos: a review. Mathematical Problems in Engineering", v.2009, Article ID 238960.
- Alexiadis, A., (2007), "Global warming and human activity: A model for studying the potential instability of the carbon dioxide/temperature feedback mechanism", *Ecological Modelling*, v.203, pp.243-256.
- Alpert, P., Krichak, S.O., Shafir, H., Haim, D. & Osetinsky, I., (2008), "Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean", *Global and Planetary Change*, v.63, pp.163-170.
- Antunes, A. & Subba Rao, T., (2006), "On hypotheses testing for selection of space-temporal models", *Journal of Time Series Analysis* v.27, pp.767-791.
- Budyko, M. I., (1969), "The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth", *Tellus*, v.21, pp.611-619.
- Capilla, C., (2008), "Time series analysis and identification of trends in a Mediterranean urban area", *Global and Planetary Change*, v.63, pp.275-281.

- Casdagli, M. (1989), "Nonlinear prediction of chaotic time series", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, v.35, pp.335-356.
- Charlson, R. J., Lovelock J. E., Andreae M. O. & Warren S. G., (1987), "Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate", *Nature*, v.326, pp.655-661.
- Cohen, J. E., & Rich, A. D., (2000), "Interspecific competition affects temperature stability in Daisyworld", *Tellus B*, v.52, pp.980-984.
- Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A. & Totterdell, I.J., (2000), "Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model", *Nature*, v.408, pp.184-187.
- De Gregorio, S., Pielke, R. A. & Dalu, G. A., (1992), "Feedback between a simple biosystem and the temperature of the Earth", *Journal of Nonlinear Science*, v.2, pp.263-292.
- Flynn, C. M., (1993), "The Gaia hypothesis and chaos in daisyworld", Colorado State University.
- Foong, S.K., (2006), "An accurate analytical solution of a zero-dimensional greenhouse model for global warming", *European Journal of Physics*, v.27, pp.933-942.
- Founda, D., Papadopoulos, K.H., Petrakis, M., Giannakopoulos, C. & Good P., (2004), "Analysis of mean, maximum, and minimum temperature in Athens from 1897 to 2001 with emphasis on the last decade: trends, warm events, and cold events", *Global and Planetary Change*, v.44, pp.27-38.
- Franca, L.F.P. & Savi, M.A., (2001), "Distinguishing periodic and chaotic time series obtained from an experimental nonlinear pendulum", *Nonlinear Dynamics*, v.26(3), pp.253-271.
- Franca, L.F.P. & Savi, M.A., (2003), "Evaluating noise sensitivity on the time series determination of Lyapunov exponents applied to nonlinear pendulum", *Shock and Vibration*, v.10(1), pp.37-50.

- Fraser, A. M. & Swinney, H. L. (1986), “Independent coordinates for strange attractors from mutual information”, *Physical Review A*, v.33, pp.1134-1140.
- Friedlingstein, P., Dufresne, J.L., Cox, P.M. & Rayner, P., (2003), “How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle?”, *Tellus B*, v.55(2), pp.692-700.
- Ghila, M., Chekroun, M.D. & Simonnet, E., (2008), “Climate dynamics and fluid mechanics: Natural variability and related uncertainties”, *Physica D*, v.237, pp.2111-2126.
- Grieser, J., Trömel, S. & Schönwiese, C.D., (2002), “Statistical time series decomposition into significant components and application to European temperature”, *Theoretical and Applied Climatology*, v.71 (3-4), pp.171-183.
- Hegger, R. Kantz, H. & Schreiber, T., (1999), “Practical implementation of nonlinear time series methods: The TISEAN package”, *Chaos*, v.9, n.2, pp.413-435.
- Holman, J. P., (1983), “Transferência de Calor”, Ed. McGraw-Hill.
- Houghton, J. (2005), “Global warming”, *Reports on Progress in Physics*, v.68, pp.1343-1403.
- IPCC, (1997), “An Introduction to simple climate models used in the IPCC second assessment report”, IPCC technical paper II, Working Group I.
- IPCC, (2001), “Climate Change 2001: working group I - the scientific basis”, URL http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/
- IPCC, (2007), “Climate change 2007: The physical science basis”, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Jacob, D.J. & Winner, D.A., (2009), “Effect of climate change on air quality”, *Atmospheric Environment*, v.43, pp.51-63.
- Joos, F., Prentice, I.C., Sitch, S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G.K., Gerber, S. & Hasselmann, K., (2001), “Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the

- intergovernmental panel on climate change (IPCC) emission scenarios”, *Global Biogeochemical Cycles*, v.15, pp.891-907.
- Kantz, H., (1994), “A Robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series”, *Physics Letters A*, v.185, pp.77-87.
- Kantz, H. & Schreiber, T., (1997), “Nonlinear time series analysis”, *Cambridge University Press*, United Kingdom.
- Kaufmann, R.K. & Stern, D.I., (1997), “Evidence for human influence on climate from hemispheric temperature relations”, *Nature*, v.388, pp.39-44.
- Kay, A.L., Davies, H.N., Bell, V.A. & Jones, R.G., (2009), “Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England”, *Climatic Change*, v.92, pp.41-63.
- Kennel, M. B., Brown, R. & Abarbanel H. D. I., (1992), “Determining embedding dimension from phase-space reconstruction using a geometrical construction”, *Physical Review A*, v.25, n.6, pp.3403-3411.
- Kettleborough, J.A., Booth, B.B.B., Stott, P.A. & Allen, M.R., (2007), “Estimates of uncertainty in predictions of global mean surface temperature”, *Journal of Climate*, v.20, pp.843-855.
- Koçak, K., Saylan, L. & Eitzinger, J., (2004), “Nonlinear prediction of near-surface temperature via univariate and multivariate time series embedding”, *Ecological Modelling*, v.173, pp.1-7.
- Krivova, N.A. & Solanki, S.K., (2004), “Solar variability and global warming: a statistical comparison since 1850”, *Advances in Space Research*, v.34, pp.361-364.
- Kueppers, L.M., Snyder, M.A., Sloan, L.C., Cayan, D., Jin J., Kanamaru, H., Kanamitsu, M., Miller, N.L., Tyree, M., Du, H. & Weare, B., (2008), “Seasonal temperature responses to land-use change in the western United States”, *Global and Planetary Change*, v.60, pp.250-264.

- Lenton, T. M. & Lovelock, J.E., (2000), “Daisyworld is Darwinian: Constraints on adaptation are important for planetary self-regulation”, *Journal of Theoretical Biology*, v.206, pp.109-114.
- Lenton, T. M. & Lovelock, J.E., (2001), “Daisyworld revisited: quantifying biological effects on planetary self-regulation”, *Tellus*, v.53B, pp.288-305.
- Loehle, C., (2004), “Climate change: detection and attribution of trends from long-term geologic data”, *Ecological Modelling*, v.171, pp.433–450.
- Lopez, A., Tebaldi, C., New, M., Stainforth, D., Allen, M. & Kettleborough, J., (2006), “Two approaches to quantifying uncertainty in global temperature changes”, *Journal of Climate*, v.19, pp.4785-4796.
- Lovelock, J. E., (1983a), “Gaia as seen through the atmosphere”, in *Biominalization and biological metal accumulation* (eds. P. Westbroek and E.E. d Jong), D. Reidei Publishing Company, pp.15-25.
- Lovelock, J. E., (1983b), “Daisy world – a cybernetic proof of the Gaia hypothesis”, *The Co-evolution Quartely*, pp.66-72.
- Lovelock, J. E., (1988), “The ages of Gaia – A biography of our living earth”, W.W. Norton, New York.
- Lovelock, J. E., (1992), “A numerical model for biodiversity”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B – Biological Sciences*, v.338, pp.383-391.
- Moore, R.J., (2007), “The PDM rainfall–runoff model. Hydrology Earth”, *System Sciences*, v.11, pp.483-499.
- Morettin, P. A. & Tolo, C. M. C., (2004), “Análise de séries temporais”, 2 ed, São Paulo, Edgard Blucher Ed.
- NASA, (2011), “National Aeronautics and Space Administration”, <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>.

- Nevison, C., Gupta, V. & Klinger, L., (1999), “Self-sustained temperature oscillations on Daisyworld”, *Tellus*, v.51B, pp.806-814.
- NOAA, (2009, 2011), “National Oceanic and Atmospheric Administration – United States Department of Commerce”, <http://www.esrl.noaa.gov>.
- North, G. R., Cahalan, R. F. & Coakley, J. A. Jr., (1981), “Energy balance climate models”, *Reviews Geophys.*, v.19, pp.91-121.
- Pinto, E. G. F. & Savi, M. A., (2003), “Nonlinear prediction of time series obtained from an experimental pendulum”, *Current Topics in Acoustical Research – Research Trends*, v.3, pp.151-162.
- Qin, Z., Ouyang, Y., Su, G., Yu, Q., Li, J., Jia-En Zhang, J. & Wu, Z., (2008), “Characterization of CO₂ and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis”, *Ecological Informatics*, v.3, pp.397-409.
- Robertson, D. & Robinson, J., (1998), “Darwinian daisyworld”, *Journal of Theoretical Biology*, v.195, pp.129-134.
- Romilly, P., (2005), “Time series modelling of global mean temperature for managerial decision-making”, *Journal of Environmental Management*, v.76, pp.61-70.
- Rybski, D. & Bunde, A., (2009), “On the detection of trends in long-term correlated records”, *Physica A*, v.388, pp.1687-1695.
- Salinger, M.J., (2005), “Climate variability and change: past, present and future, an overview”, *Climate Change*, v.70, pp.9-29.
- Savi, M. A., (2005), “Chaos and order in biomedical rhythms”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v.XXVII, n.2, pp.157-169.
- Savi, M. A., (2006), “Dinâmica não-linear e caos”, Editora E-papers.
- Schreiber, T., (1999), “Interdisciplinary application of nonlinear time series methods”, *Physics Reports*, v.308, pp.1-64.

- Subba Rao, T. & Antunes, A., (2003), "Spatio-temporal modelling of temperature time series: a comparative study. In Time Series Analysis and Applications to Geophysical Systems", eds: F. Schonberg. D. R. Brillinger and E. Robinson. IMA Publications, New York: Springer-Verlag, pp.123-150.
- Sugimoto, T., (2002), "Darwinian evolution does not rule out the Gaia hypothesis", *Journal of Theoretical Biology*, v.218, pp.447-455.
- Staley, M., (2002), "Darwinian selection leads to Gaia", *Journal of Theoretical Biology*, v.218, pp.35-46.
- Stringham, T.K., Krueger, W.C. & Shaver, P.L., (2003), "State and transition modeling: An ecological process approach". *Journal of Range Management*, v.56(2), pp.106-113.
- Takens, F., (1981), "Detecting Strange Attractors in Turbulence", Warwick, Lecture notes in Mathematics 898, Ed. D. Rand and L. S Young, Springer, pp.366-381.
- UNFCCC, (1992), "United Nations framework convention on climate change", URL <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>.
- Urban, D.L., (2005), "Modeling ecological processes across scales", *Ecology*, v.86(8), pp.1996-2006.
- Viola, F. M., Paiva, S. L. D. & Savi, M. A., (2010) "Analysis of the Global Warming Dynamics from Temperature Time Series", *Ecological Modelling*, v.221, n.16, pp.1964-1978.
- Viola, F.M., Savi, M. A., Santos Sobrinho, S., Brasil Junior, A. C. P., (2009), "A Qualitative Description of the Global Warming Dynamics". In: COBEM 2009 - 20th International Congress of Mechanical Engineering, 2009, Gramado. COBEM 2009 - 20th International Congress of Mechanical Engineering.
- Watson, A. J. & Lovelock, J. E., (1983), "Biological homeostasis of global environment: the parable of Daisyworld", *Tellus*, v.35B, pp. 284-289.

- Weigend, A. S. & Gershenfeld, N. A., (1994), “Time series prediction: forecasting the future and understanding the past”, Perseus Books.
- Worldlog, (2009), - <http://www.worldlog.com.br>.
- Wood, A. J., Ackland G. J., Dyke J. G., Williams H. T. P., & Lenton T. M., (2008), “Daisyworld: A review”, *Reviews of Geophysics*, 46, RG1001 23pp.
- WMO, (2010), “World Meteorological Organization”, URL <http://www.wmo.int>, visitada em março de 2010.
- Young, P.C. & Ratto, M., (2009), “A unified approach to environmental systems modeling”. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v.23, pp.1037-1057.
- Zeng, X., Pielke, R. A. & Eykholt, R., (1990), “Chaos in daisyworld”, *Tellus*, v 42B, pp.309-318.