

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS  
MICROMETEOROLÓGICAS MEDIDAS EM  
FLORESTA DE CAMBARAZAL NO PANTANAL  
MATOGROSSENSE UTILIZANDO  
A TEORIA DA COMPLEXIDADE**

**GEISON JADER MELLO**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iramaia Jorge Cabral de Paulo**

**Orientadora**

**Cuiabá, Novembro de 2010**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS  
MICROMETEOROLÓGICAS MEDIDAS EM  
FLORESTA DE CAMBARAZAL NO PANTANAL  
MATOGROSSENSE UTILIZANDO  
A TEORIA DA COMPLEXIDADE**

**GEISON JADER MELLO**

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Física Ambiental da Universidade  
Federal de Mato Grosso, como parte  
dos requisitos para a obtenção do  
título de mestre em Física Ambiental.

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iramaia Jorge Cabral de Paulo**

**Orientadora**

**Cuiabá, Novembro de 2010**

M527a

Mello, Geison Jader.

Análise de séries temporais de variáveis micrometeorológicas medidas em floresta de Cambarazal no Pantanal matogrossense utilizando a teoria da complexidade / Geison Jader Mello - Cuiabá (MT): O Autor, 2010.

78 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Física Ambiental). Universidade Federal de Mato Grosso. Instituto de Física. Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Iramaia Jorge Cabral de Paulo.

Inclui bibliografia.

1. Atrator. 2. Dimensão de correlação. 3. Dimensão embutida. I. Título.

CDU: 53:504

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

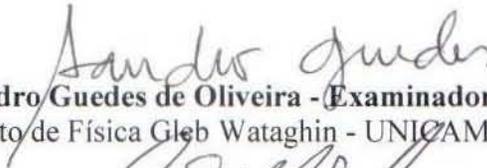
**TÍTULO: ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS  
MICROMETEOROLÓGICAS MEDIDAS EM FLORESTA  
DE CAMBARAZAL NO PANTANAL MATOGROSSENSE  
UTILIZANDO A TEORIA DA COMPLEXIDADE**

**AUTOR: GEISON JADER MELLO**

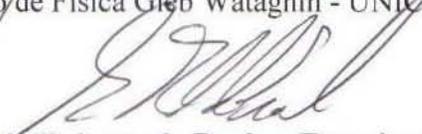
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 26 de novembro de 2010, pela comissão julgadora:



**Profa. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo – Orientadora**  
Instituto de Física - UFMT



**Prof. Dr. Sandro Guedes de Oliveira - Examinador Externo**  
Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP



**Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo – Examinador Interno**  
Instituto de Física – UFMT

## **DEDICATÓRIA**

**Dedico este trabalho ao Pai Criador, pelas possibilidades que me apresentou; ao meu amado filho Vitor pelos seus olhinhos inspiradores e a meus pais pelo incentivo.**

## AGRADECIMENTOS

- \*À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Iramaia Jorge Cabral de Paulo pela fé depositada e preciosidade de suas orientações;
- \*Ao Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo, pelo companheirismo, por sua orientação preciosa, tranqüila e clara, mesmo nos tópicos mais “complexos”;
- \*Ao Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes pela amizade sincera e valiosas orientações;
- \*Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira, pela motivação, por apontar a direção correta e por compartilhar de suas experiências;
- \*Ao Prof. Edward B. de Castro, pelo exemplo, amizade e apoio sem medida;
- \*Aos meus bons amigos da Pós Graduação em Física Ambiental, pelo auxílio nesta caminhada; Geraldo, Osvaldo “Fú”, Vicente, Flair, Elis Dener, Marcos, Stefano, Ivan, Prof. Denilton; Paulo Zanela, Eduardo e Prof. Alfredo Jorge;
- \*Aos Profs. Drs. José Holanda Campelo Júnior, Francisco de Almeida Lobo, Carmen Eugenia Rodriguez Ortiz, Carlo Ralph De Muis e Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, pelos preciosos conhecimentos compartilhados ao longo do curso;
- \*Aos funcionários da Pós-Graduação em Física Ambiental: Soilce e Cesário; pela gentileza e polidez;
- \*À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro;
- \*A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS .....  | vi |
| LISTA DE TABELAS .....  | ix |
| RESUMO .....  | x  |
| ABSTRACT .....  | xi |
| INTRODUÇÃO .....  | 1  |
| REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA.....  | 3  |
| MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS .....   | 3  |
| INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DA COMPLEXIDADE.....   | 6  |
| MATERIAL E MÉTODOS .....  | 14 |
| LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....   | 14 |
| INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA .....  | 19 |
| METODOLOGIA .....   | 22 |
| Geometria Fractal .....   | 22 |
| Espaço de Fase e Atratores .....  | 23 |
| Reconstrução do Espaço de Fase do Atrator .....                                       | 26 |
| Atrator de Lorenz .....   | 26 |
| Reconstrução do Atrator de Lorenz.....  | 28 |
| Método de Análise.....  | 32 |
| Experimento Teórico para Análise de Dados .....                                       | 33 |
| RESULTADOS E DISCUSSÕES .....   | 39 |
| RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ALGORÍTMO.....   | 39 |
| DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO           (DIMENSIONALIDADE FRACTAL<br>DO ATRATOR) ["d"] ..... | 54 |
| DIMENSÃO MÍNIMA (GRAUS DE LIBERDADE) DO ESPAÇO DE FASE<br>["n"].....                  | 59 |
| SAZONALIDADE EM RELAÇÃO À DIMENSIONALIDADE FRACTAL ["d"]<br>.....                     | 61 |
| SAZONALIDADE COM RELAÇÃO AOS GRAUS DE LIBERDADE ["n"] .....                           | 62 |
| PANTANAL E FLORESTA AMAZÔNICA: COMPARAÇÃO ENTRE OS<br>ECOSSISTEMAS .....              | 63 |
| CONCLUSÃO .....   | 65 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 69 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS CITADAS.....   | 69 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS CONSULTADAS.....   | 75 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>FIGURA 1.</b> (a) (b) dois pontos de vista das células de convecção (células de Bénard); e (c) sentido de rotação das células adjacentes. ....  | 9  |
| <b>FIGURA 2.</b> Mapa do Brasil, com locaização da área de vegetação monodominante de Cambará na RPPN SESC – Pantanal (Cambarazal) e a área de transição Cerrado/ Floresta Amazônica.....  | 18 |
| <b>FIGURA 3.</b> Torre micrometeorológica na RPPN SESC – Pantanal (Cambarazal). ....   | 20 |
| <b>FIGURA 4.</b> Brocoli romanesco (a) e modelo matemático de brócolis romanesco em detalhe (b).....   | 22 |
| <b>FIGURA 5.</b> O eixo horizontal (x) representa a posição do pêndulo, o eixo vertical (v) a velocidade. ....   | 23 |
| <b>FIGURA 6.</b> Espaço de fase de um pendulo ideal, a Separatrix. ....  | 25 |
| <b>FIGURA 7.</b> Atratores: pontual, ciclo limite, torus, e estranho.....  | 25 |
| <b>FIGURA 8.</b> Atrator de Lorenz plotado a partir das variáveis x, y, z .....  | 27 |
| <b>FIGURA 9.</b> Reconstrução do Atrator de Lorenz a partir da variável X com defasagem temporal muito pequena ( $\tau = 0,02$ s).....   | 29 |
| <b>FIGURA 10.</b> Reconstrução do Atrator de Lorenz a partir da variável X com defasagem temporal muito grande ( $\tau = 1$ s).....  | 29 |
| <b>FIGURA 11.</b> Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada x, com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$ segundos).....   | 30 |
| <b>FIGURA 12.</b> Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada Y, com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$ segundos).....   | 30 |
| <b>FIGURA 13.</b> Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada z, com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$ s). ....   | 31 |
| <b>FIGURA 14.</b> $\ln C(r)$ vs $\ln r$ para difentes valores de dimensões do espaço de fase. ....   | 36 |
| <b>FIGURA 15.</b> Dependência da dimensão de correlação “d”(dimensionalidade fractal) quanto ao numero das variáveis (graus de liberdade).no espaço de fase “n” .....  | 37 |
| <b>FIGURA 16.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período seco, julho de 2007. .... | 40 |
| <b>FIGURA 17.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período seco, agosto de 2007..... | 41 |

|   |    |
|---|----|
| <b>FIGURA 18.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período chuvoso, janeiro de 2008.....    | 42 |
| <b>FIGURA 19.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período chuvoso, fevereiro de 2008. .... | 43 |
| <b>FIGURA 20.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, março de 2008. ....    | 44 |
| <b>FIGURA 21.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, abril de 2008.....     | 45 |
| <b>FIGURA 22.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, maio de 2008. ....     | 46 |
| <b>FIGURA 23.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período seco, julho de 2008.....         | 47 |
| <b>FIGURA 24.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período seco, agosto de 2008.....        | 48 |
| <b>FIGURA 25.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período chuvoso, janeiro de 2009.....    | 49 |
| <b>FIGURA 26.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período chuvoso, fevereiro de 2009. .... | 50 |
| <b>FIGURA 27.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, março de 2009. ....    | 51 |
| <b>FIGURA 28.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao numero das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, abril de 2009.....     | 52 |

|   |    |
|---|----|
| <b>FIGURA 29.</b> (a) $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1) Rn, (2) T e (3) UR, período inundado, maio de 2009. .... | 53 |
| <b>FIGURA 30.</b> Tendência sazonalmente do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores. ....   | 61 |
| <b>FIGURA 31.</b> Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade “n” necessários para explicar as variáveis Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR). ....  | 62 |
| <b>FIGURA 32.</b> Tendência sazonalmente do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores “d” da Temperatura do Ar (T) para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado. ....  | 63 |
| <b>FIGURA 33.</b> Tendência sazonalmente do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores da Umidade Relativa do Ar (UR).para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado. ....  | 64 |
| <b>FIGURA 34.</b> Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade necessários para explicar a variável Temperatura do Ar (T) para o Pantanal e para Amazônia – Cerrado. ....  | 64 |
| <b>FIGURA 35.</b> Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade necessários para explicar a variável Umidade Relativa do Ar (UR) para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado. ....  | 64 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>TABELA 1.</b> Subdivisão dos dados por características de estação. ....   | 21 |
| <b>TABELA 2.</b> Valores da dimensionalidade fractal ( $d$ ) dos atratores das variáveis Balanço de Radiação ( $R_n$ ), Temperatura do Ar ( $T$ ) e Umidade Relativa do Ar ( $UR$ ), obtidas dos gráficos “joelhos” [componentes (b) das Figuras 15 a 28] a partir da saturação de $d$ versus $n$ , com 12 graus de liberdade ( $n = 12$ ) no espaço de fase. .... | 54 |
| <b>TABELA 3.</b> Classificação das variáveis quanto ao comportamento: Periódico (I), Quase-Periódico (II) e Não-Periódico (III). ....  | 57 |
| <b>TABELA 4.</b> Número Mínimo de Graus de Liberdade no Espaço de Fase das variáveis Balanço de Radiação ( $R_n$ ), Temperatura do Ar ( $T$ ) e Umidade Relativa do Ar ( $UR$ ), obtidos dos gráficos “joelhos” (componentes (b) das Figuras 15 a 28). ....  | 59 |

## RESUMO

MELLO, G. J. *Análise de Séries Temporais de Variáveis Micrometeorológicas Medidas em Floresta de Cambarazal no Pantanal Matogrossense Utilizando a Teoria da Complexidade*. Cuiabá, 2010. 78p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Analisou-se as séries temporais das variáveis micrometeorológicas Balanço de Radiação ( $R_n$ ), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) provenientes de torre experimental na floresta de Cambarazal no Pantanal Norte Mato-Grossense, com dados referentes ao período de julho de 2007 à maio de 2009, buscando identificar os atratores do sistema dinâmico ambiental através do método de dimensão de correlação. Os resultados do parâmetro dimensão de correlação ( $d$ ) da variável  $R_n$  manteve-se entre  $1 < d < 2$  em todas as análises e sazonalidades, possibilitando inferir que, dentre as séries temporais das variáveis analisadas e períodos considerados, é a mais simples de ser modelada. Houve variabilidade sazonal dos parâmetros dimensão de correlação ( $d$ ) e dimensão embutida ( $n$ ) para as variáveis T e UR. Todas as variáveis diminuíram, em média, o valor do parâmetro dimensão embutida ( $n$ ) no período seco. A variável UR apresentou oscilações não-periódicas em todas as sazonalidades, principalmente no período chuvoso em que todas as classificações foram marcadamente não-periódicas. Séries temporais de variáveis micrometeorológicas medidas em floresta de Cambarazal, podem apresentar oscilações periódicas, quase-periódicas e também comportamento não-periódico de baixa dimensão, sendo que das variáveis analisadas, a UR se apresenta como a mais complexa de ser modelada. É feita uma comparação com dados de floresta de transição Amazônia-Cerrado (Sinop-MT), em que UR encontrou-se sazonalmente fora de fase.

**Palavras-chave:** atrator, dimensão de correlação, dimensão embutida.

## ABSTRACT

MELLO, G. J. *Time Series Measurements Analysis of Micrometeorological Variables in Forest Cambarazal of Pantanal Matogrossense Using the Theory of Complexity*. Cuiabá, 2010. 78p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Radiation Balance (Rn), Air Temperature (T) and Relative Humidity (RH) are variables of micrometeorological time series collected in the experimental tower of Cambarazal forest in North Pantanal of Mato Grosso between July 2007 and May 2009. The data were analyzed looking for identify the attractors of the environment dynamic system through the method of dimension correlation. The results for the fractal dimensionality of the variable Rn in all analysis and seasonality remained between  $1 < d < 2$ , making it possible to infer that, among the series of variables and periods considered, it is the simplest variable to be modeled. There was seasonal variability of the parameters dimension correlation (d) and embedding dimension (n) for variables T and RH. All variables had, on average, the value of n decreased in the dry season. The RH showed non-periodic oscillations in all seasons, especially during the rainy season, when all the ratings were markedly non-periodic. Time series of micrometeorological variables measured in Cambarazal forest can present periodic oscillations, quasi-periodic and also non-periodic behavior of low dimension, and the variables analyzed, the RH is presented as the most complex to be modeled. A comparison is made with data from Amazon-Cerrado transition forest (Sinop-MT), UR is presented seasonally out of phase.

**Keywords:** attractor, correlation dimension, embedding dimension.

## INTRODUÇÃO

Mudanças no clima estatisticamente significativas que podem ser referentes a várias hipóteses, tais como eventos naturais, eventos de variação da radiação extraterrestre e atividade antropogênicas, sejam emissão de gases para a atmosfera e/ou pelo forma de uso da terra, tornam os conhecimentos sobre os aspectos micrometeorológicos como temperatura, umidade relativa do ar e balanço de radiação e suas distribuições no tempo e no espaço cada vez mais relevantes para a compreensão das relações sistêmicas entre o cerrado, pantanal, floresta amazônica e as mudanças climáticas globais no contexto científico internacional consoante com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

A America do Sul conserva parte significativa da sua biodiversidade. Entre elas está o Pantanal, a maior planície de inundação periódica, localizada entre os biomas do Amazonas e do Cerrado, com uma bioclimatologia peculiar e regulada pelos pulsos de inundação com enchentes e secas definidas delineando a sazonalidade regional.

O deflorestamento é parte da atividade antrópica inserida na dinâmica de ocupação do espaço, com vistas à agricultura e pecuária, exercendo impactos negativos junto aos ecossistemas locais como é o caso da vegetação mono-dominante de Cambará (*Vochysia divergens* Pohl), na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) SESC – Pantanal Matogrossense. Estas práticas podem influenciar

mudanças no clima, por isso a necessidade de pesquisas que contribuam com conhecimentos sobre níveis do equilíbrio dinâmico da biosfera e da atmosfera local e suas frequências.

A sobrevivência humana sempre esteve ligada ao conhecimento dos ritmos da natureza de forma que através deste saberes pudessem ser feitas projeções do futuro. O advento da Mecânica Clássica com base no determinismo das relações matemáticas levou a crer que fosse possível chegar a uma compreensão segura da dinâmica do universo. No entanto, estudos do fim do século XIX sobre certos sistemas, resultaram em dúvidas quanto a essa previsibilidade, e ainda se apresentavam extremamente sensíveis ao conjunto de dados iniciais, sendo de difícil – ou de praticamente impossível – previsão, ligada a uma evolução não-periódica dos sistemas. Nos sistemas complexos alguns resultados podem ser incertos no que tange a evolução temporal em função de seus parâmetros de controle. Regras simples repetidas inúmeras vezes conduzem ao acaso, chamado caos determinístico. Os sistemas complexos se encontram no limiar do regime caótico.

O sistema de interação biosfera-atmosfera se apresenta com um sistema complexo pela troca de matéria, energia e momentum, por ser dissipativo, fora do equilíbrio, auto-organizado e não determinístico.

Desse modo, o objetivo essencial deste trabalho é analisar e identificar os atratores referentes ao Balanço de Radiação ( $R_n$ ), à Temperatura do Ar ( $T$ ) e à Umidade Relativa do Ar ( $UR$ ) do sistema dinâmico ambiental pela análise de séries temporais de variáveis micrometeorológicas medidas no Pantanal Mato-Grossense, determinando sua dimensionalidade ( $d$ ), a caoticidade da série temporal, e o número mínimo de graus de liberdade no espaço de fase ( $n$ ) para explicar a variável em questão, assim como é proposto por NICOLIS e PRIGOGINE (1998).

## **REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA**

### **MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS**

Um ponto azul no universo, com bilhões de anos e em permanente mudança, com cinco grandes extinções, sendo a extinção dos dinossauros a 65 milhões de anos a mais famosa. Este é planeta Terra, um sistema ambiental aberto possuidor de um equilíbrio dinâmico, caracterizado pela troca de matéria, energia e momentum entre a biosfera, a atmosfera e espaço aberto.

A configuração de alguns parâmetros de controle estreitamente relacionados possibilitam a existência de vida neste planeta, tais como temperatura e pressão adequados a existência de água no estado sólido, gasoso, e principalmente no estado líquido. Também a distância do Sol e a composição da atmosfera proporciona um balanço de energia gerador de fenômenos físicos e reações químicas distante do equilíbrio termodinâmico, e confortáveis à vida.

Segundo MATURANA (2007), os seres vivos se caracterizam por produzirem de modo contínuo a si próprios em uma organização autopoietica. A biosfera em sua totalidade é autopoietica, ou seja, se organiza sustentando a si mesma. De seus órgãos vitais, a atmosfera é claramente cuidada e alimentada; possuindo aproximadamente 1/5 de oxigênio e com três partes para dez mil de CO<sub>2</sub>. Se a atmosfera não se compusesse de seres que consomem dióxido de carbono (plantas,

algas e bactérias fotossintéticas) há muito tempo já teria chegado a uma estabilidade química rica em dióxido de carbono. Os primeiros seres surgidos à aproximadamente 4 bilhões de anos trouxeram consigo um gene que é a chave para todas as formas de vida contadas no planeta, e essas mesmas células se acoplaram estruturalmente dando origem aos seres vivos de hoje, que por sinal são fungos, bactérias e micróbios vivendo em simbiose constituindo os corpos de seres vivos, do animal humano às plantas, conforme MARGULIS (2001).

De acordo com a hipótese de Gaia, LOVELOCK (1992), o sistema Terra comporta-se como um super organismo, e vem apresentando estados de alterações de alguns dos seus ritmos naturais. É possível afirmar em uma análise mais aproximada que os ecossistemas que compõem esse grande organismo estão sofrendo danos irreversíveis em sua fauna e flora, evidenciado pelo número de extinções. Ao pensar-se senhor da natureza, mesmo com tão pouco tempo de existência enquanto espécie, o homem tomou o natural e o estabeleceu recurso material subserviente ao capital, alcançando elevado nível técnico científico, que por sua vez são diretamente proporcionais aos impactos ambientais provocados.

Historicamente, a ação antrópica sempre interferiu nesse equilíbrio dinâmico, e hoje com a moderna tecnologia, essa ação tornou-se muito mais intensa. Os impactos nos ecossistemas nos últimos dois séculos foram por demais ampliados, alcançando patamares destrutivos e dramáticos nos sistemas naturais e repercutindo dos microclimas ao clima global. Em certo sentido, a mente humana tende se excluir da natureza e pensá-la de forma mecanicista e particionada, em completa desarmonia com os ciclos de vida sistêmicos do planeta, como explana CAPRA (2007) e (2006).

Com a invenção e expansão da máquina a vapor e com uso em grande escala dos combustíveis fósseis, características marcantes da Revolução Industrial a partir do século XIX, houve a ruptura com as formas primárias de produção e de subsistência, os quais eram de certa forma sustentáveis, ou menos impactantes. O meio ambiente passou a ser visto pelo novo modelo de crescimento econômico como recurso essencial e eternamente ilimitado. A produção industrial de gêneros de consumo humano como alimentos, roupas, medicamentos, etc, usando a energia solar armazenada a 300 ou 400 milhões de anos na forma de combustível fóssil, são

aspectos que levaram ao crescimento exponencial da população nesses últimos dois séculos elevando de menos de 1 bilhão para mais de 6 bilhões de pessoas no planeta. O sistema social humano e seus subsistemas estão trabalhando com uma energia muito superior a disponível pelo sol em períodos diários ou anuais como foi utilizado naturalmente durante milênios. Existe então, uma dependência do combustível fóssil no que se refere a quantidade de energia consumida e a manutenção da sociedade humana, sendo diretamente proporcional uma a outra. Essa mesma energia aumentou o ritmo de extração dos demais recursos naturais, subordinando toda a sociedade a esta forma de energia. O seqüencial de eventos promovidos pela dependência do petróleo leva a crise moderna de distúrbio global, conhecido como mudança climática ou aquecimento global. Alterações do equilíbrio químico natural da atmosfera que faz com que a temperatura aumente, conforme IPCC (2007) e *The 11th Hour* (2007)

Este tema tem sido foco de intensos debates e preocupações por parte dos cientistas contemporâneos. Stephen Hawking em *The 11th Hour* (2007) alerta para a influência da ação antrópica no aquecimento global: **“O aquecimento global causado por níveis altos de gás carbônico na atmosfera provenientes da queima de combustível fóssil é uma das conseqüências mais sérias das ações antrópicas. Existe o perigo de que o aumento da temperatura se torne auto-suficiente, ou se retro-alimente. Secas em várias regiões, desmatamentos de florestas tropicais estão diminuindo a quantidade de gás carbônico reciclado da atmosfera e o aquecimento pode contribuir para a liberação de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> preso no fundo dos oceanos. O derretimento do gelo nas calotas polares diminui o albedo, parcela da energia solar incidente que é refletida para o espaço aumentando ainda mais a temperatura.”**

Os impactos já são percebidos nos regimes de água, sejam nos padrões de chuvas, enchentes e secas, ou seja, no fluxo dos rios durante o ano todo tão relacionados com o uso d'água.

Vapor d'água, gás carbônico e metano são alguns dos chamados gases de efeito estufa, que contribuem para a estabilidade térmica do planeta. O efeito estufa é um fenômeno natural que faz com que a temperatura da Terra seja maior do que seria

na ausência de atmosfera permitindo assim que ocorra a vida da forma como a conhecemos. Na ausência deste efeito a temperatura média da Terra seria  $-18^{\circ}\text{C}$  ao invés dos  $15^{\circ}\text{C}$  que temos hoje, ou seja,  $33^{\circ}\text{C}$  menor. Uma fração da radiação emitida pelo Sol, radiação de ondas curtas, incide sobre a superfície do planeta, é absorvida e reemitida no comprimento de onda longas, radiação térmica (infravermelho). Os gases de efeito estufa presentes na atmosfera também absorvem essa radiação para em seguida reemitir-la em todas as direções, inclusive novamente para a superfície da Terra mantendo-a mais aquecida durante as noites. Segundo CPTEC/INPE (2009), esse princípio faz parte do balanço de energia sendo composto atualmente pelo equilíbrio entre a energia absorvida pelo sistema e a energia que é emitida pelo sistema.

## **INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DA COMPLEXIDADE**

Nas batidas do coração, na oscilação de um pêndulo, num cristal de gelo ou mesmo num floco de neve podemos observar diferenças e semelhanças. Os fenômenos físico-químicos parecem de certa forma se apresentar simples e previsíveis, podendo ser interpretados com um pequeno número de interações fundamentais. No entanto, uma análise de dados experimentais leva à conclusão de que o comportamento desses fenômenos são mais complexos do que se poderia intuir, e necessitam de uma visão pluralística e interdisciplinar do mundo físico. Esta visão pode acomodar diferentes tipos de fenômenos coexistentes lado a lado, condicionados das formas mais variadas, e inter-relacionando suas diversas partes com os mais diversos sistemas. (CAPRA, 2006)

O pensamento mecanicista tende a explicar os fenômenos físicos (queda livre, oscilação pendular, etc.) como fundamentalmente simples, e eles realmente parecem simples pelo fato de que apenas um objeto ou uma força (ou muito poucas) estão envolvidos. Ao contrário, pensa-se o sistema econômico, a linguagem, o cérebro, ou até mesmo a menor bactéria como um sistema complexo pelo fato de estar envolvido um grande número de elementos interagindo entre si. Aguçando o olhar sobre um

centímetro cúbico de um fluido gasoso ou líquido (água, por exemplo), encontram-se um grande número de elementos em interação, bilhões de bilhões de moléculas, que pela ótica da mecânica clássica, parece desprovido de qualquer forma coordenada de dinâmica, todas as moléculas colidindo aleatoriamente parecem fazer coisa nenhuma e indo a lugar nenhum; esta leitura do sistema torna este vasto número de moléculas insuficiente para qualificar este sistema como complexo. Mas mesmo com seus distúrbios erráticos, que é frequentemente referido pelos físicos como o caos molecular, no qual as moléculas se movem de forma incoerente, e devido à limitação em distinguir dinâmicas em escala nanométrica, ainda é possível considerar esse sistema como um protótipo de comportamento complexo. A partir desse mesmo centímetro cúbico de água contempla-se a obra da natureza: um floco de neve com suas características dendríticas criado nas condições de uma tempestade de inverno. Ou seja, os mesmo sistemas podem aparecer sob diferentes aspectos, evocando impressões sucessivas de simplicidade e complexidade. A complexidade é uma idéia que faz parte de nossa experiência cotidiana, sendo encontrada em um contexto diversificado e estando intimamente relacionado com as manifestações da vida.

**[...] ”é mais natural, ou, menos ambíguo, falar de um comportamento complexo ao invés de sistemas complexos. O estudo do comportamento irá revelar certas características comuns entre as diferentes classes de sistemas e vai nos permitir chegar a uma compreensão adequada da complexidade.” (NICOLIS & PRIGOGINE, 1989)**

A ciência é, acima de tudo um empreendimento experimental, e uma parte significativa da experimentação é a observação, então se observa os diferentes sistemas para ter uma idéia de generalidade e importância dos fenômenos complexos.

Desde a década de 1960, há uma revolução nas ciências matemáticas e físicas impondo nova atitude na descrição da natureza e dos fenômenos da vida. Paralelo ao desenvolvimento da teoria termodinâmica dos fenômenos irreversíveis, a teoria dos sistemas dinâmicos têm convergido para mostrar de forma convincente que a diferença entre comportamento simples e complexo, entre desordem e ordem, é muito mais estreita do que se pensava anteriormente. Exemplos de sistemas

mecânicos simples são conhecidos por apresentar comportamento complexo. (NICOLIS & PRIGOGINE, 1989)

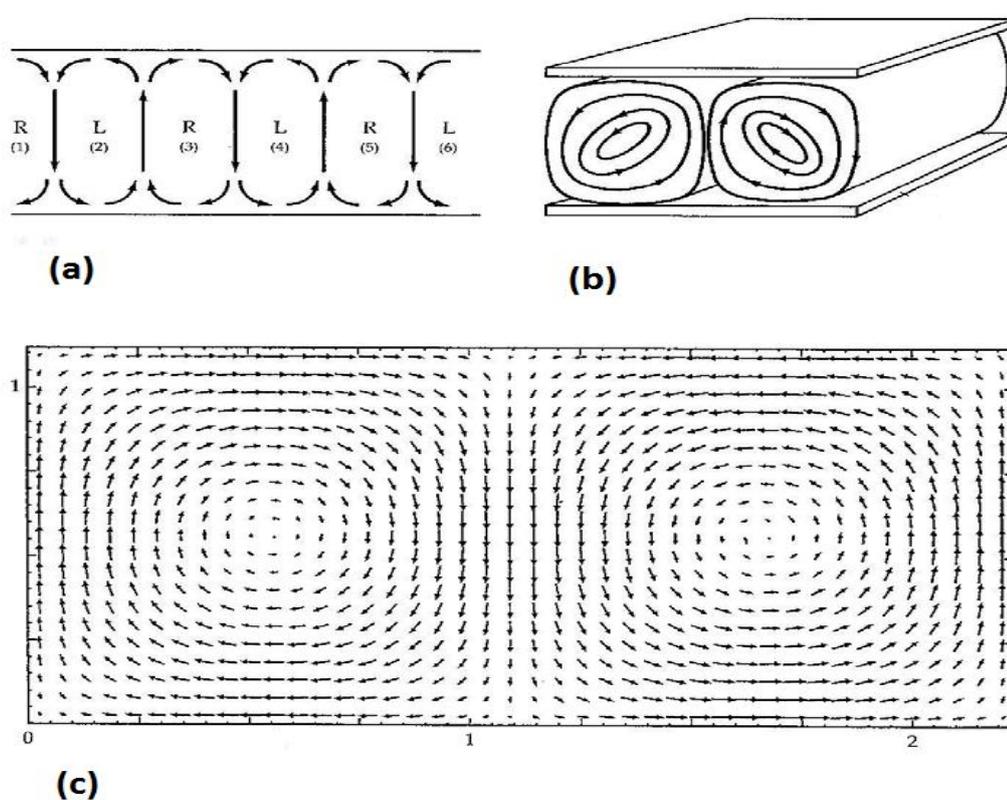
Um pêndulo forçado periodicamente na fronteira entre a oscilação e a rotação dá origem a uma rica variedade de movimentos, como trajetórias quase-periódicas ou não-periódicas possibilitando a formação de um estado de estabilidade dinâmica distante do equilíbrio. Portanto os sistemas comuns, como uma camada de líquido ou uma mistura de produtos químicos em geral, podem sob certas condições (fenômenos de auto-organização em escala macroscópica) formar padrões espaciais ou ritmos temporais. Em suma, a idéia de complexidade não é mais limitada somente à biologia, está nas ciências físicas e parece estar profundamente enraizada nas leis da natureza.

Considerando-se as massas de fluidos (líquidos e gases) sob o efeito da falta de homogeneidade da temperatura, observa-se a geração de um movimento conhecido como convecção térmica, que é a base de vários fenômenos importantes e espetaculares do nosso planeta, a exemplo tem-se a circulação atmosférica e oceânica, que é determinante para as mudanças climáticas de curtos e longos prazos, outro exemplo é o desvio Continental, o movimento induzido por movimentos de placas continentais de grande escala no manto.

A convecção térmica atmosférica promovida pelo balanço de radiação solar é fator preponderante nas trocas de energia, matéria e momento. Por sua vez, pode-se estudar o mecanismo de convecção térmica em laboratório com uma configuração de dimensões mais modestas do que os continentes ou o sistema planetário. Este experimento simples foi realizado pela primeira vez em 1900 pelo físico francês Henri Bénard, que observou um número de propriedades surpreendentes. O experimento consiste na observação do comportamento de um fluido contido num recipiente que é aquecido por baixo e resfriado por cima.

No início do aquecimento, o sistema adota um estado simples e único em que o calor é transportado por condução, da placa inferior à placa superior, onde é evacuado para o ambiente externo. Em comparação com o estado de equilíbrio, a única diferença é um gradiente de temperatura, densidade e pressão através do fluido.

A energia térmica é conduzida de regiões quentes para regiões mais frias apenas por colisões moleculares. Este fenômeno é conhecido como condução térmica. O comportamento do sistema nesse estado é predominante de estabilidade. Aumentando-se gradativamente a diferença de temperatura entre superfície inferior e a superior, de repente, em uma condição chamada crítica, o fluido começa a executar um movimento em massa. Mais ainda, esse movimento está longe de ser aleatório: a estrutura do fluido se organiza em uma pequena série, chamada células de convecção representada na Fig. 1, conhecidos como células de Bénard (BÉNARD, 1901).



**FIGURA 1.** (a) (b) dois pontos de vista das células de convecção (células de Bénard); e (c) sentido de rotação das células adjacentes. (MARESCHAL et al., 1988)

O fluido entra em regime de convecção térmica, com a sua porção inferior próxima à placa caracterizando-se por uma densidade menor que a da parte superior. A análise detalhada de Prigogine de células de Bénard mostrou que como o sistema se afasta do equilíbrio, ele atinge um ponto crítico de instabilidade, na qual o padrão ordenado hexagonal emerge e que, durante a convecção, o calor é transferido pelo movimento coerente de grande número de moléculas. (CAPRA, 2006)

A complexidade deste movimento convectivo tem como semente uma força muito modesta, mas isto é uma questão de escala visto o universo de o sistema ter sido totalmente modificado, podendo até mesmo decidir o sentido de rotação pelo movimento horizontal/vertical de célula para célula (direita ou esquerda) e o número de células. Esse número de partículas que passam a se comportar de forma coerente apesar do movimento térmico aleatório é uma das principais propriedades que caracterizam a emergência de comportamentos complexos.

Conceitos como complexidade, ordem e desordem tem sido parte integrante da biologia, mas até poucas décadas estavam fora da tendência atual da física, de forma que a possibilidade de usá-los para descrever os conceitos fundamentais do comportamento dos sistemas físicos assim como dos seres vivos é um grande avanço da ciência.

Chega-se assim a uma notável cooperação entre o acaso e o determinismo, que é uma reminiscência dual de mutação (probabilidade) e seleção natural (determinismo) tão familiar na teoria da evolução de Darwin, e que anteriormente era limitado dentro das ciências físicas. Em resumo, o não-equilíbrio parece permitir aos sistemas evitar a desordem térmica e transforma parte da energia transmitida ao fluido em um novo comportamento ordenado, uma estrutura dissipativa: regime caracterizado pela quebra de simetria, múltiplas escolhas, e as correlações na extensão macroscópica. Logo, testemunha-se o nascimento da complexidade, de forma modesta, porém, que tem as mesmas características atribuídas até então exclusivamente a sistemas biológicos, e ainda longe de desafiar as leis da física, a complexidade aparece como consequência inevitável quando essas leis são cumpridas. (NICOLIS & PRIGOGINE, 1989)

Buscar compreender o meio ambiente e as mudanças climáticas globais leva a Ciência da Complexidade a quebrar as barreiras disciplinares criando novas formas de olhar problemas que a muito ocupam os cientistas. E sugere fortemente uma modelagem de sistemas a partir do uso de ferramentas matemáticas empregadas na Teoria do Caos que deve beneficiar as novas perspectivas de estudo dos fenômenos complexos em sistemas dinâmicos não lineares.

Mesmo buscando explicar os principais fenômenos da morfogênese, Alan Turing em seu famoso artigo *The Chemical Basis of Morphogenesis* (TURING, 1952) não postula novas hipóteses, e sim limita-se a sugerir que certas leis conhecidas da física são suficientes para explicar muitos dos fatos observados. Afirma também que o pleno entendimento do papel dessas leis exige um certo conhecimento elementar da matemática, da biologia e da química. Seu artigo apresentou a primeira formalização matemática de um sistema biológico.

As reações químicas proporcionam muitos exemplos de formação de estruturas espaciais, temporais e espaço-temporais. Em 1958, o russo Boris Belousov descreve uma reação química oscilante que parecia ir contra as Leis da Termodinâmica (PECHENKIN, 2009), e em 1961, Anatol M. Zhabotinsky redescobre a reação química de Belousov; que passa a ser conhecida como Reação BZ (NICOLIS & PRIGOGINE, 1998). Em estudos posteriores Zhabotinsky afirma que processos de reação química oscilante podem desempenhar um papel semelhante aos fenômenos de memória de curto prazo, arritmia cardíaca, morfogênese e evolução pré-biótica (ZHABOTINSKY & ZAIKIN, 1973).

No campo das pesquisas meteorológicas, o famoso sistema de equações de Lorenz (LORENZ, 1963) apresenta um atrator no espaço de fase das variáveis e também sensibilidade às condições iniciais do sistema. Este fato marca um aprofundamento decisivo no estudo do caos. Ruelle e Takens (1971) com um artigo de conteúdo matemático abstrato apresenta o problema da natureza da turbulência, com o mérito de ser verificável experimentalmente. Foi nesse artigo que se encontrou pela primeira vez a expressão atrator estranho. Esse foi o ponto de partida de uma corrida experimental para tentar descobrir a existência de comportamentos não periódicos (BERGÉ et al., 1996).

A famosa resenha de Robert May (1976) sobre lições de caos em biologia das populações, afirma que equações diferenciais de primeira ordem surgem em vários contextos das ciências biológicas, econômicas e sociais, e ainda que tais equações, embora simples e determinista, podem exibir uma surpreendente gama de comportamentos dinâmicos, pontos estáveis, ciclos estáveis, flutuações aparentemente aleatória e uma hierarquia de bifurcações; o que demonstra o

comportamento obedecido a cada transformação não-linear simples durante o aumento de um “parâmetro de controle”.

Conforme Moon (2004), as primeiras trajetórias caóticas experimentais foram traçadas em 1979 por uma equipe de Cornell University, USA. Eles mediram precisamente três variáveis envolvidas na dinâmica de um sistema mecânico tipo oscilador forçado. No entanto quando se trabalha com sistemas complexos (sistemas ambientais, por exemplo), não se conhece todas as suas variáveis (ou seja, os graus de liberdade no espaço de fase), ou ainda, não se pode medi-los em sua totalidade. Essa limitação foi em grande parte resolvida no ano de 1981 por Floris Takens<sup>1</sup> (TAKENS apud BERGÉ et al., 1996) com seu Método das Defasagens Temporais, que possibilita a partir de uma única variável, calcular tantas outras quanto for necessário. Em 1983 os físicos Peter Grassberger e Itamar Procaccia (GRASSBERGER & PROCACCIA, 1983) apresentaram um algoritmo para a determinação da dimensionalidade fractal (correlation dimension) das trajetórias dos atratores no espaço de fase das variáveis. O algoritmo também permite saber quantas variáveis se encontram acopladas à dinâmica do sistema estudado. Este algoritmo revolucionou as análises de séries temporais, sendo aplicado nos mais diversos sistemas, das mais diversas áreas tais como na meteorologia, climatologia, biologia, e previsões financeiras.

A geração de um vasto número de artigos na área de meteorologia e micrometeorologia, inclusive na análise de sistemas que apresentam comportamentos complexos, discutindo, reforçando, e apontando limitações do algoritmo de Grassberger e Procaccia, evidencia que embora a teoria já tenha quase 30 anos, não foi refutada e é promissora quanto a sua utilidade na sondagem de atratores estranhos (TSONIS, 1993; SIVAKUMAR, 2004; KIM et al., 2008).

O grupo de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, da Universidade Federal de Mato Grosso vem apresentando trabalhos inseridos na Complexidade, buscando encontrar atratores climáticos e caracterizá-los quanto sua dimensionalidade fractal e número mínimo de variáveis para explicar as séries

---

<sup>1</sup>TAKENS, F. Detecting Strange Attractors in Turbulence. **Lecture Notes in Mathematics**, p.366-381. 1981 apud BERGÉ, P., POMEAU, Y., DUBOIS-GANCE, M. **Dos ritmos ao caos**. 1. ed. São Paulo, UNESP, 1996. 301p.

temporais. Na linha de Interação Biosfera-Atmosfera, com dados provenientes de floresta de transição Amazônia-Cerrado já foram produzidos trabalhos de análise de séries temporais para o melhor tempo de defasagem temporal (PALÚ, 2008) e comparações sazonais das dimensionalidades fractais dos atratores de fluxos de CO<sub>2</sub>, calor latente e calor sensível temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, direção do vento e velocidade de fricção assim como o número mínimo de graus de liberdade no espaço de fase para melhor explicar essas variáveis (GALLON, 2005; CAPISTRANO, 2007). Também Vidal (2009), com dados provenientes do Destacamento de Controle do Espaço Aéreo de Cuiabá (região de cerrado) analisou as variáveis direção do vento, intensidade do vento, umidade relativa, temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, pressão máxima, pressão média, pressão mínima, quantidade de precipitação e duração de precipitação referentes ao período de 1983 e 2007 algoritmo de Grassberger e Procaccia (1983).

Investigou-se a possibilidade de inserção de tópicos de complexidade no ensino fundamental e médio por meio de uma experiência de ensino entre professores de Ciências da Natureza e Matemática, no qual a maioria dos professores assumiram abordar o tema de forma pontual, utilizando seus conhecimentos gerais e específicos das disciplinas que lecionam, e ainda houve movimentação no ambiente escolar no sentido de repensar as práticas pedagógicas em favor de uma abordagem mais unificada dos fenômenos naturais. (JORGE NETO, 2009).

No cenário internacional destaca-se o Santa Fé Institute, no Novo México, USA, especialmente dedicado ao estudo de sistemas complexos e que vem liderando em pesquisas na área desde os anos 80. Os estudos em dinâmica não-linear e caos, e sistemas discretos, apresentaram técnicas e abordagens para a resolução de problemas úteis nas áreas de ciências, e serviram como ponto de partida para o reconhecimento de novos princípios. A aplicação da auto-organização em estados de dinâmica crítica é um deles. Progressos significativos foram feitos na compreensão de diversos fenômenos, tal como a criticidade das chuvas, a modularidade em redes complexas e dimensionamento metabólico com massa corporal. (WALDROP, 1992).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL**

A presente análise foi realizada com dados provenientes de uma área experimental na Reserva Particular de Preservação Nacional – RPPN SESC – Pantanal, município de Barão do Melgaço – MT, aproximadamente 150 km de Cuiabá – MT, onde se localiza uma torre micrometeorológica com 32 metros de altura (coordenadas geográficas 16°33'19"S, 56°17'11"O, altitude de 120m).

### **INSERÇÃO REGIONAL**

O Estado de Mato Grosso é composto de três grandes ecossistemas, Pantanal, Cerrado e Floresta Tropical Úmida. Reune uma biodiversidade peculiar, além de se configurar como um divisor de águas das três maiores bacias hidrográficas brasileiras: Bacia Amazônica, Bacia do Araguaia-Tocantins e Bacia do Rio Paraguai. Conta atualmente com mais de três milhões de habitantes nos seus 141 municípios. Em relação à ocupação do espaço, modificação da paisagem e uso do solo no contexto regional dos ecossistemas, se compôs de uma intensa ocupação humana ao longo dos últimos 30 anos, sem uma política embasada em estudos científicos sobre

impactos antrópicos, implicando em deflorestamento motivado pela indústria madeireira e/ou para dar lugar ao agronegócio. Somam-se aos principais fatores de migrações para a região os incentivos políticos para ocupação da Amazônia e Cerrado, uma diversidade de recursos naturais presentes no Centro-Oeste e Norte, o rápido desenvolvimento econômico, clima com estações chuvosas e secas bem definidas e terras agricultáveis e baratas (em comparação com outras regiões do país). Tornou-se o maior produtor nacional de soja e algodão, possuindo também o maior rebanho bovino do país, com sua agroindústria em um momento de crescimento rápido, apresentando pesquisas de caráter agropecuário voltadas à adaptação de cultivares ao clima local e ampliação de produtividade. Dessa forma, estudos dos aspectos físicos ambientais dos ecossistemas da região e as suas correlações com a ação humana podem contribuir para a preservação dos recursos naturais, e também para a compreensão das relações sistêmicas entre o Cerrado, Pantanal, Floresta Amazônica e as mudanças climáticas globais.

As pesquisas da área de ciências naturais apontam para as transformações do meio ambiente ao longo do tempo e as suas trocas de matéria e energia entre a biosfera e a atmosfera. A atividade humana é uma das causas dos impactos nos ecossistemas locais, efetivado através de queimadas e emissão de gases, aumentando das médias da temperatura e diminuição da umidade do ar, assim como o ciclo hidrológico também tem se apresentado irregular com chuvas mais intensas em períodos mais curtos, picos de 400 a 500 mm de precipitação em apenas um mês de acordo com Vidal (2009), em uma região com média anual em torno de 1400mm.

Os possíveis cenários das mudanças climáticas com eventos extremos tais como prolongamento das secas, intensificação das enchentes e elevação das médias das temperaturas em alguns graus, indicam que as regiões de baixa latitude podem ser as mais impactadas na sua produção agrícola, diminuindo a oferta de alimento e o queda do Produto Interno Bruto (PIB) pela importância local do setor da agricultura. Desta forma se fazem necessários estudos para compreensão e modelagem desses ecossistemas no sentido de se tornarem vetores de políticas públicas ambientais e racionalização para sustentabilidade de recursos naturais. (BRASIL, 2008)

## **Pantanal**

Localizado na Bacia do Alto Rio Paraguai, na Região Centro-Oeste, o Bioma Pantanal abrange parte dos estados do Mato Grosso (35%) e Mato Grosso do Sul (65%), da unidade geomofológica denominada Planície do Pantanal, mais conhecida como Pantanal Matogrossense. Esta planície, cujas origens estão relacionadas a movimentos de compensação ocorridos na época do soerguimento da Cordilheira dos Andes, representa a parte mais rebaixada e mais plana da bacia hidrográfica e constitui-se na maior superfície inundável interiorana do mundo. Exceto por uma pequena faixa que adentra o Paraguai e a Bolívia, o Bioma Pantanal está restrito ao território brasileiro. As inundações que anualmente ocorrem nessa planície, por atingirem grande extensão, serem de longa duração e por imprimirem modificações importantes ao meio físico, na vida silvestre e no cotidiano das populações locais, constituem o fator determinante da existência de um macrossistema classificável como bioma.

A Planície Pantanal está posicionada num nível de altitude entre 80 e 150m e seus solos são predominantemente pouco permeáveis; apresenta declividade quase nula e possui apenas um vertedouro “a calha do rio Paraguai no seu prolongamento para a confluência com o rio Paraná. Estas características físicas fazem com que, a cada ano, após alguns meses de chuvas, a Planície do Pantanal se transforme numa imensa área alagada, com grande parte dos biótopos terrestres passando para biótopos aquáticos, situação que só começa a se reverter a partir do início do outono. O período de inundação é também uma fase de exposição das particularidades do relevo que fazem com que a Planície Pantanal não se apresente totalmente uniforme, mas como um verdadeiro mosaico de paisagens, que se expressam por feições regionalmente conhecidas como baías, cordilheiras, vazantes e corixos. Além disso, apresenta outras diferenciações que possibilitam a identificação de diversos “pantanais” no seu interior, relacionados com a frequência, a altura e a duração das inundações nos diferentes setores da aérea de abrangência. Reúne representantes de quase toda a fauna brasileira nos seus ecossistemas e, durante o período de inundação, parte desta fauna se desloca para as áreas altas vizinhas, principalmente

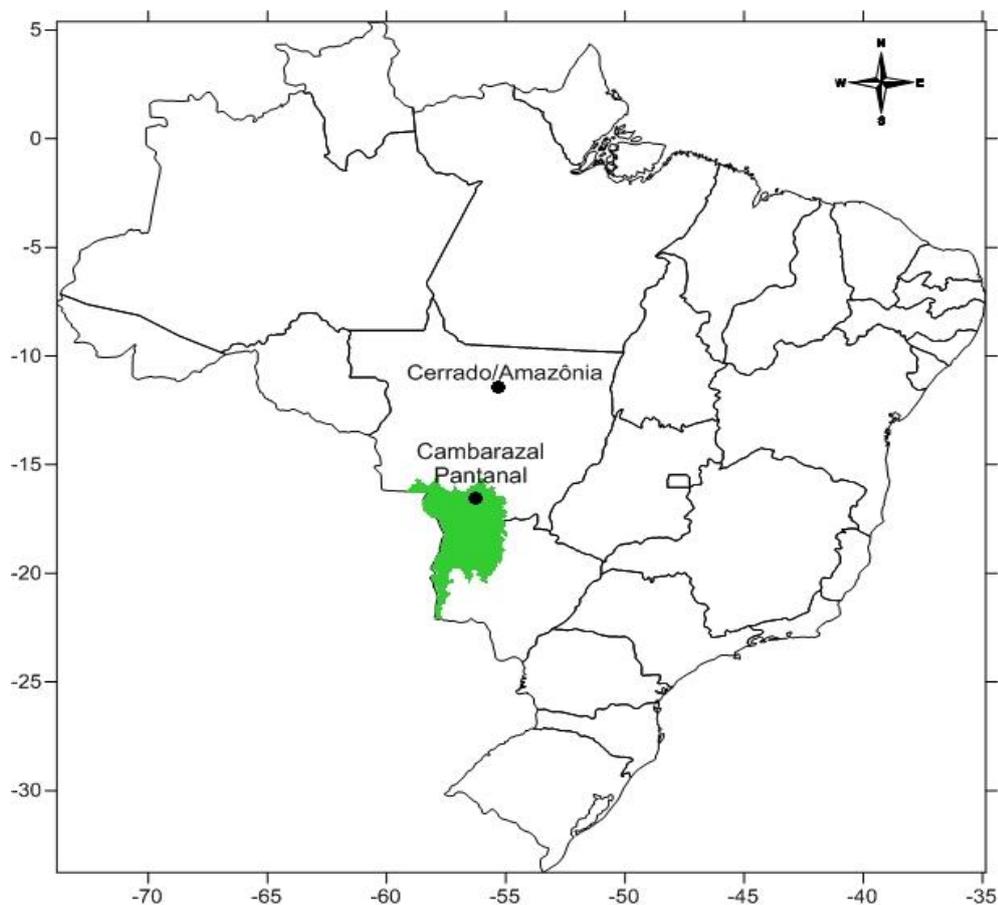
os mamíferos e aves, ou se refugiam nas áreas não alagadas, de onde só retornam quando as águas baixam. O esvaziamento das superfícies inundáveis representam o início do processo de retomada desses espaços por plantas e animais, estes por vezes em grandes bandos em busca de recursos proporcionados pela elevação das águas. (BRASIL, 2004)

A base da economia do Bioma Pantanal é a pecuária de corte extensiva, sendo que a indústria do turismo, que durante muito tempo foi alimentada basicamente pelos adeptos da pesca pluvial, sofreu grande incremento nas últimas décadas e hoje já se constitui na segunda maior fonte de renda da região. Neste mesmo período, as superfícies que circundam o Pantanal tiveram grande parte da cobertura vegetal original substituída por lavouras e pastagens, num processo que tende a se acelerar e que está repercutindo na planície, principalmente pelo assoreamento dos rios e das superfícies mais rebaixadas. Além disto, a região passou a ter os seus recursos minerais (ouro, diamante, ferro, manganês) explorados com maior intensidade, geralmente com poucos em relação à conservação ambiental. Para a delimitação do Bioma Pantanal levou-se em consideração os limites da Depressão Pantaneira combinados com os limites considerados pela Convenção de Ramsar, sempre que possível ajustados às seguintes tipologias vegetacionais identificadas no mapa de vegetação, com as respectivas formações remanescentes: a Savana sendo a tipologia dominante, seguida da Savana Estépica, com a ocorrência esparsa de Floresta Estacional Decidual e Semidecidual. E mais a ocorrência das seguintes Áreas de Tensão Ecológica: Contato Savana/Floresta Estacional (SN), Contato Savana/Savana Estépica (ST), Contato Savana Estépica/Floresta Estacional (TN). (BRASIL, 2004)

A característica de maior distinção desse ecossistema é o seu pulso de inundação monomodal, configurador de um microclima, fauna e flora peculiares. Salienta-se uma relação inversamente proporcional entre a altura da inundação e a diversidade de espécies (ARIEIRA & NUNES DA CUNHA, 2006), de modo que a torre micrometeorológica tem ao seu redor uma vegetação florestal monodominante de cambará (*Vochysia Divergens*), vulgo Cambarazal, que tem apresentado rápido espalhamento em campos sazonalmente inundados, efeito este atribuído às mudanças climáticas ocorridas em ciclos plurianuais. O Cambarazal apresenta 29 metros de

altura de dossel, distribuído em uma faixa contínua com aproximadamente 25 km de extensão e 4 km de largura paralela ao rio Cuiabá; fixada sobre um solo GLEISSOLO HÁPLICO (BELLAVÉ, 2010) e clima AW segundo Köppen. A temperatura anual média do ar na RPPN SESC-Pantanal oscila entre 22°C e 32°C e a precipitação média anual entre 1100 e 1200 mm (HASENACK et al, 2003).

A Figura 11 apresenta a localização do Cambarazal e a área de transição Floresta Amazônica/Cerrado.



**FIGURA 2.** Mapa do Brasil, com localização da área de vegetação monodominante de Cambará na RPPN SESC – Pantanal (Cambarazal) e a área de transição Floresta Amazônica/Cerrado.

## INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

A torre micrometeorológica do Cambarazal possui inúmeros equipamentos de medição e armazenamento de dados, dos quais somente os dados provenientes de alguns deles foram escolhidos para esta análise, tal como um saldo radiômetro (Net Radiometer, Kipp & Zonen Delft, Inc., Holland) instalado a 32 m de altura, ou seja, através deste instrumento afere-se o saldo da radiação de ondas curtas e longas que incidem na superfície (positivo) pela radiação de ondas curtas e longas que são emitidas por ela (negativo). No período noturno a radiação incidente é maior do que a reemitida pelo solo, no período noturno pela ausência observa-se o oposto.

Utilizou-se também um termohigrômetro instalado a 37,7 m de altura, modelo HMP 45 C (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA) que é projetado para efetuar medidas de temperatura e umidade relativa do ar, tanto em ambientes fechados (interno) quanto em ambientes abertos (externos). O seu processo de funcionamento baseia-se em um sensor de temperatura do ar (resistor de platina), calibrado e estabilizado por uma associação de resistores. As variações de resistência são medidas por um circuito eletrônico que apresenta em sua saída uma tensão contínua com 1,0 volt representando +70°C e 0,0 volt representando -30°C. O elemento sensor da umidade relativa do ar é um filme higroscópico posicionado entre dois eletrodos, constituindo um capacitor. A capacitância depende da umidade absorvida pelo filme higroscópico (o dielétrico do capacitor) e representa a umidade relativa do ar. A capacitância medida é convertida numa tensão contínua com correção automática para a temperatura.

E ainda um datalogger modelo CR 10X (Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA). A alimentação dos equipamentos a uma tensão de 12 V se deu através de um banco de quatro baterias de 150 Ah cada, carregadas por quatro painéis solares de 64 W.



**FIGURA 3.** Torre micrometeorológica na RPPN SESC – Pantanal (Cambarazal).

Os dados utilizados nesta análise são séries temporais de saldo de radiação ( $R_n$ ), temperatura do ar ( $T$ ) e umidade relativa do ar ( $UR$ ). Estas variáveis foram medidas com uma frequência de 10Hz, com médias registradas a cada 15 minutos, perfazendo 48 dados diários e aproximadamente 3000 dados mensais. Escolheu-se trabalhar com  $R_n$ ,  $T$  e  $UR$  devido ao forte acoplamento dessas variáveis no espaço de fase das variáveis nos sistemas climáticos (PEREIRA et al., 2002).

Devido a uma preocupação em comparar os resultados desta análise com trabalhos semelhantes já realizados em áreas de florestas em Mato Grosso, levou-se em consideração a estação seca e a estação chuvosa. Também analisou-se o período alagado, característica peculiar do local. Desta forma, a análise dos dados deste trabalho é referente ao período de julho de 2007 à maio de 2009, perfazendo um espectro de dois anos, que por sua vez foi subdividido segundo as características

sazonais: seca 2007, chuva 2008, inundação 2008 e seca 2008, chuva 2009 e inundação 2009.

Neste trabalho considerou-se como período inundado os meses de março, abril e maio. Segue tabela especificando as características de cada estação.

**TABELA 1.** Subdivisão dos dados por características de estação.

| <b>Ano / Meses</b>         | <b>Sazonalidade</b> |
|----------------------------|---------------------|
| 2007 / julho e agosto      | Período seco        |
| 2008 / janeiro e fevereiro | Período chuvoso     |
| 2008 / março, abril e maio | Período inundado    |
| 2008 / julho e agosto      | Período seco        |
| 2009 / janeiro e fevereiro | Período chuvoso     |
| 2009 / março, abril e maio | Período inundado    |

## METODOLOGIA

### Geometria Fractal

Da necessidade de uma descrição mais apurada dos fenômenos e objetos da natureza surge a geometria fractal. Os modelos matemáticos definidos na geometria clássica de Euclides (300 a.C.), com suas linhas, retas e círculos perfeitos se apresentam incompletos quando aplicados na arquitetura natural, pois tais objetos só podem ser medidos adequadamente em espaços de dimensão fracionária, ou seja, não inteira. Um fractal, termo cunhado por MANDELBROT (1977), do adjetivo latino *fractus* e do verbo *frangere*, significa quebrar, é um objeto geométrico construído de maneira que o seu todo é similar em todas as suas escalas sucessivamente reduzidas, (FALCONER, 2003). “Acima de tudo, fractal significa auto-semelhante, ou seja, simetria através de escalas. Significa recorrência, um padrão dentro de um padrão *ad infinitum*.” (GLEICK, 1989). Um exemplo prático de se observar é o brócolis fractal, quanto mais for ampliada a imagem, mais pode ser observado os padrões se repetindo em escala diferentes.



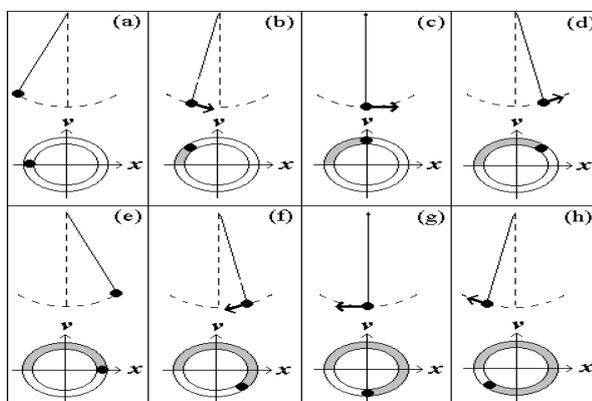
**FIGURA 4.** Brocoli romanesco (a) e modelo matemático de brócolis romanesco em detalhe (b).

Estas formações intrincadas no espaço são uma reminiscência de objetos complexos que podem ser descritos por leis matemáticas. Este olhar mais aguçado permite vislumbrar padrões e formas ocultos na aparente desordem da natureza, estruturando uma base matemática para as asperezas e irregularidades do mundo real (STEWART, 1991). A aplicação desta teoria é imprescindível para a determinação

da dimensão de correlação (ou dimensionalidade fractal) dos atratores estranhos no espaço de fase (GRASSBERGER & PROCACCIA, 1983; ECKMANN & RUELLE, 1985; NICOLIS & PRIGOGINE, 1989).

### Espaço de Fase e Atratores

É possível ilustrar o conceito de espaço de fase usando outro exemplo: o espaço dinâmico do pêndulo ideal. ”Podemos inscrever, em função do tempo, tanto o ângulo  $A$  que o pêndulo faz a cada instante com a vertical, quanto a sua velocidade instantânea  $V$ . [...] também podemos traçar a curva que traduz a relação entre duas variáveis, ou seja, a velocidade em função da posição do pêndulo. Essa curva se fecha sobre si mesma depois de um período  $T$  e é descrita recursivamente pelo ponto representativo do estado do pêndulo, de um período ao seguinte. Tão logo é atingido o estado de equilíbrio. (BERGÉ et al., 1996). Quando a velocidade é máxima o ângulo é mínimo e vice versa periodicamente.



**FIGURA 5.** O eixo horizontal (x) representa a posição do pêndulo, o eixo vertical (v) a velocidade.

A vantagem de tal representação é evidenciar a menor perturbação que pode ocorrer no movimento do pêndulo (por um desvio da trajetória), mas, sobretudo é fornecer muito claramente a “fase” do movimento a cada instante, no sentido de “fase temporal”, como quando se fala das “fases da Lua”. O espaço matemático em que a curva é traçada chama-se, pois, o espaço das fases. Ele também poderia ser chamado de espaço das variáveis, pois as grandezas que constituem as suas

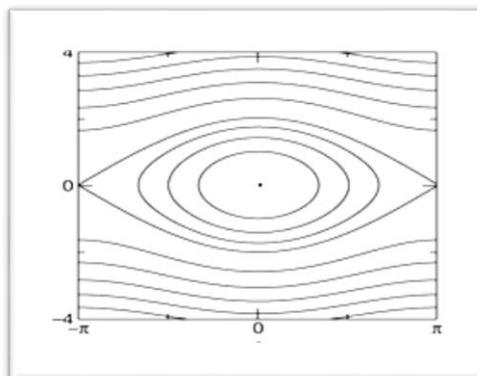
coordenadas são as variáveis independentes (diz-se também “graus de liberdade”) do sistema. (BERGÉ et al., 1996)

No espaço de fase, o conhecimento total sobre o sistema dinâmico num instante único do tempo resume-se a um ponto: esse ponto é o sistema dinâmico – naquele instante. No instante seguinte, o sistema se terá modificado, mesmo que seja levemente, e assim o ponto se move. A história do tempo do sistema pode ser registrada num gráfico pelo ponto móvel, traçando-se a sua órbita pelo espaço de fase com o passar do tempo. Se o comportamento é repetitivo e estável, como um relógio de pêndulo, então o sistema volta a essa órbita depois de quaisquer pequenas perturbações. No espaço de fase as trajetórias próximas da órbita são atraídas para ela; a órbita de um atrator (GLEICK, 1989). Uma vantagem de se ver os estados como pontos no espaço é que isso torna mais fácil a observação da mudança, permitindo repensar o próprio sistema, suas periodicidades, torções correspondendo a mudanças, vazios correspondendo a impossibilidades físicas, enfim, um vislumbre do atrator do sistema.

Por definição, o atrator é um conjunto de atração em um espaço de fase. Os atratores diferentes dos estados de equilíbrio e das oscilações rigorosamente periódicas recebem o nome de atratores estranhos. (OSIPÓV, 2003)

Este atrator estranho existe apenas no espaço de fase, uma das invenções mais poderosas da ciência moderna. O espaço de fase também proporciona uma maneira de transformar números em imagens, extraindo todas as informações essenciais de um sistema de partes móveis, mecânicas ou fluidas, e traçando um flexível mapa topológico de todas as suas possibilidades. (GLEICK, 1989)

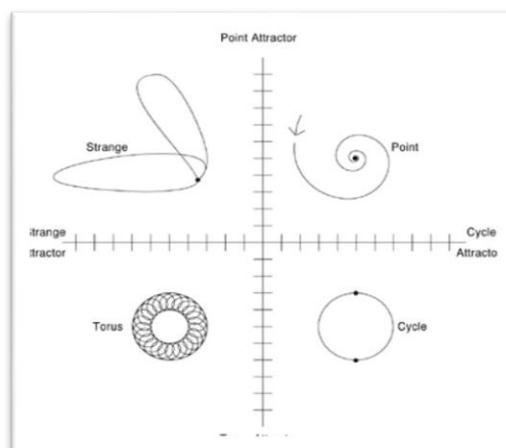
Na figura abaixo podemos identificar três regiões principais no espaço de fase, sejam o ponto fixo  $(0,0)$  considerado estável; os círculos fechados correspondentes à oscilação periódica; e os pontos fixos hiperbólicos em  $\pm\pi$  que descrevem um equilíbrio instável. Eles são unidos por um circuito fechado de dois segmentos de separatrizes. Uma condição inicial com mais energia, ou seja, fora deste ciclo, dá origem a um movimento de rotação pendular livre.



**FIGURA 6.** Espaço de fase de um pendulo ideal, a Separatrix.

Se tomarmos um modelo de oscilação pendular dissipativa, observaremos que o comportamento no espaço de fase tende a um ponto fixo. Por outro lado se tomarmos um modelo de oscilação pendular conservativo, ou seja, munido de uma entrada constante de energia para garantir a sustentação do movimento contínuo, teremos um ciclo limite.

Se o sistema dissipa energia tendendo a um ponto fixo, é chamado de atrator do sistema de ordem zero, pontual. Mas se é possível identificar a tendência que o sistema tem de permanecer em um ciclo limite, teremos um atrator de ordem 1 (um). Um regime bi periódico apresenta um atrator de ordem 2 (dois), um exemplo é o torus. Os atratores quase periódicos ou fractais são comumente chamados de atratores estranhos (RUELLE & TAKENS, 1971) ou atratores fractais, possuindo dimensionalidade fracionária.



**FIGURA 7.** Atratores: pontual, ciclo limite, torus, e estranho.

## **Reconstrução do Espaço de Fase do Atrator**

A compreensão dos processos naturais não se inicia com um conjunto de equações para a dinâmica desse sistema. Ao contrário, tais modelos são construídos geralmente ao final de um processo que consiste na identificação dos fenômenos estudados, da realização de inúmeras medidas e finalmente uma análise matemática. Algumas vezes nesse processo surge a ordem, complexidade, ou mesmo caos. É necessário um método para encontrar uma equação que determine o fenômeno estudado, ou se os dados são apenas ruído sem sentido. Para saber se a série temporal vêm de um atrator é preciso quantificar este atrator. (PEITGEN et al., 2004)

Tendo essa série temporal, podemos reconstruir algumas imagens significativas de um atrator oculto. Se os dados da respectiva série temporal forem determinísticos, ou possuírem algum padrão, existe a perspectiva dessa série prover informações valiosas sobre o atrator, sobre sua dimensionalidade, e ainda a dimensionalidade mínima do espaço de fase dentro do qual este atrator mencionado está embutido (GRASSBERGER & PROCACCIA, 1983; NICOLIS & PRIGOGINE, 1989; PEITGEN et al., 2004). Essas informações sobre o sistema podem ser inferidas a partir da própria serie temporal, pois a variável em questão é acoplada às outras variáveis desconhecidas, devendo ser fortemente dependente de seus próprios dados anteriores.

Assim, este método de análise de séries temporais pode levar a resultados úteis. O fato é que uma aplicação direta deste procedimento muito simples nos permite vislumbrar a estrutura geométrica do atrator do sistema estudado.

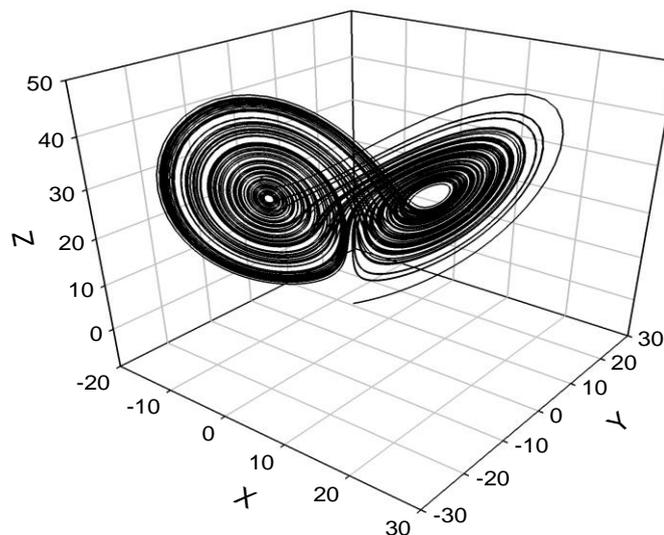
### **Atrator de Lorenz**

Os dados resultantes desta dissertação podem ser importantes para uma possível modelagem da interação biosfera-atmosfera do Cambarazal, logo optou-se pela revisão bibliográfica do modelo do meteorologista norte-americano Edward Lorenz, que foi desenvolvido para convecção em fluidos e ganhou fama por

apresentar comportamento caótico. Este modelo (LORENZ, 1963), que apresenta um atrator estranho no espaço de fase das variáveis, busca representar a atmosfera terrestre que é aquecida pelo solo (maior absorvedor da radiação solar) e dissipa essa energia térmica para o espaço, ou seja, um modelo aquecido por baixo e resfriado por cima. Compõem-se de três parâmetros de controle sendo  $\rho$  (numero de Rayleigh),  $\sigma$  (número de Prandtl) e  $\beta$  (dimensões da região objeto de estudo); e ainda três variáveis, sendo  $x$  velocidade de convecção,  $y$  variação de temperatura horizontal e  $z$  variação de temperatura vertical.

A partir das equações propostas por Lorenz (1963) em seu famoso artigo "Deterministic Nonperiodic Flow" construiu-se o atrator estranho (possuidor de um formato característico que lembra as asas de uma borboleta) com os parâmetros de controle:  $\rho = 25$  ( $470/19=24,74$ ),  $\sigma = 10$ ,  $\beta = 8/3$  e a partir das variáveis  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$ .

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \qquad \frac{dy}{dt} = x(\rho - z) - y \qquad \frac{dz}{dt} = xy - \beta z$$



**FIGURA 8.** Atrator de Lorenz plotado a partir das variáveis  $x$ ,  $y$ ,  $z$

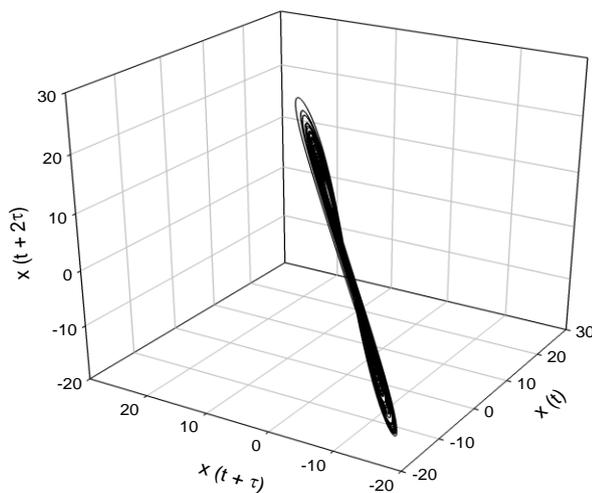
O primeiro atrator estranho. O ponto movimenta-se ao longo da trajetória no espaço de fase, dando laçadas, ilustrando uma rotação lenta, caótica, de um fluido, modelado pelas três equações para a convecção (LORENZ, 1963). Neste atrator, uma extraordinária estrutura em escalas invisivelmente pequenas, quando o calor crescente do sistema empurra o fluido em uma direção, a trajetória permanece do lado direito; quando o movimento rotativo para e se inverte, a trajetória oscila para a outra asa. É um atrator estável, de baixa dimensionalidade fractal e não-periódico. (GLEICK, 1989).

### Reconstrução do Atrator de Lorenz

Para efeito de análise, pode-se imaginar que não se conhece as equações do atrator de Lorenz, e que se possui apenas uma série temporal de um sistema climático,  $X_0(t)$ , na qual esse atrator está escondido. A partir disso, pode-se obter (ou reconstruir) outras variáveis  $\{X_k(t)\}$  (sendo  $k=1, \dots, n-1$ ) conhecendo somente  $X_0(t)$ . Desmembrando a série temporal original  $X_0(t)$  em deslocamentos temporais sucessivos de defasagem fixa  $\tau$  ( $\tau = m\Delta t$ , onde  $m$  é um número inteiro e  $\Delta t$  é um intervalo entre sucessivas amostras) para “ $n$ ” pontos equidistantes do conjunto de dados. Isto é:

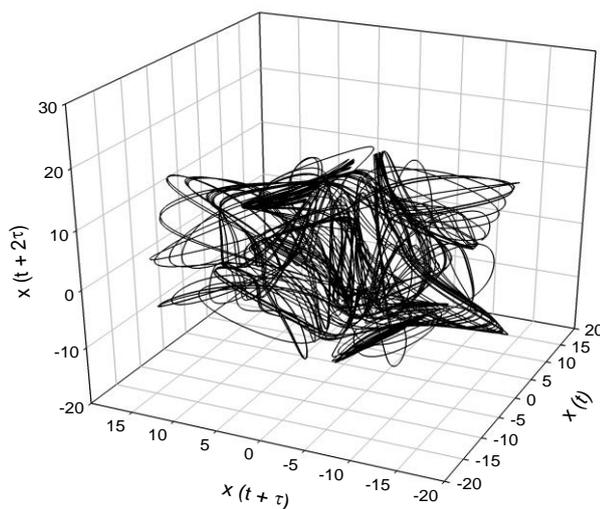
$$\begin{aligned} X_0: & X_0(t_1), \dots, X_0(t_N) \\ X_1: & X_0(t_1 + \tau), \dots, X_0(t_N + \tau) \\ & \vdots \\ & \vdots \\ X_{n-1}: & X_0[t_1 + (n-1)\tau], \dots, X_0[t_N + (n-1)\tau] \end{aligned}$$

A melhor escolha de  $\tau$  deve apresentar uma independência linear entre a série original e as séries defasadas, ou seja a menor correlação, no intuito de obter o maior informação possível do sistema estudado. No entanto, na prática, existem limitações. Se  $\tau$  é muito pequeno, então os vetores a ser desenhadas terão componentes que são quase idênticas, resultando em um atrator reconstruído, que será muito perto da diagonal do espaço.



**FIGURA 9.** Reconstrução do Atrator de Lorenz a partir da variável X com defasagem temporal muito pequena ( $\tau = 0,02$  s)

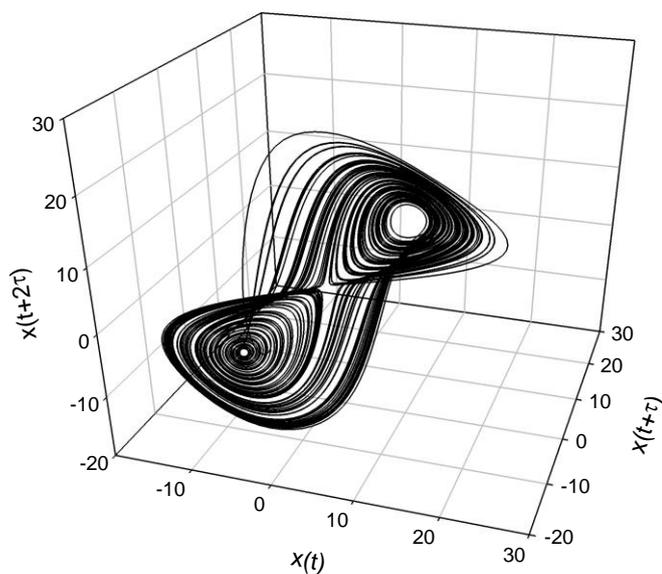
Por outro lado, se  $\tau$  é muito grande, então há muito pouca correlação entre as componentes dos vetores e trajetórias no atrator parecem vagar por todo espaço de fase tal que a estrutura é difícil de detectar.



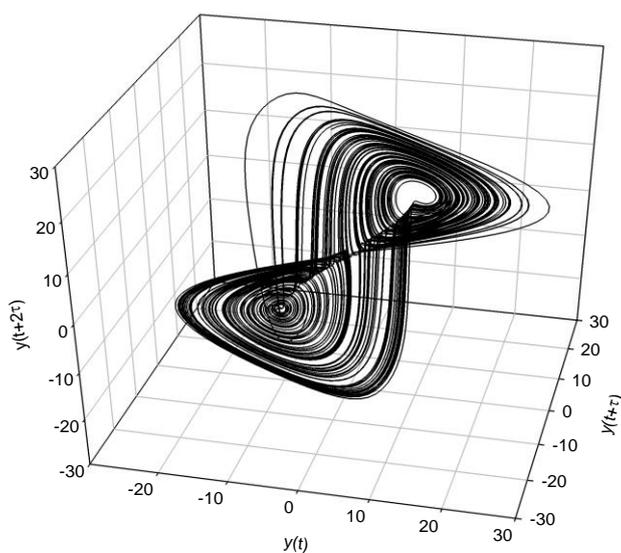
**FIGURA 10.** Reconstrução do Atrator de Lorenz a partir da variável X com defasagem temporal muito grande ( $\tau = 1$  s)

Assim, o atrator reconstruído não é idêntico ao original, mas uma cópia mais ou menos distorcida.

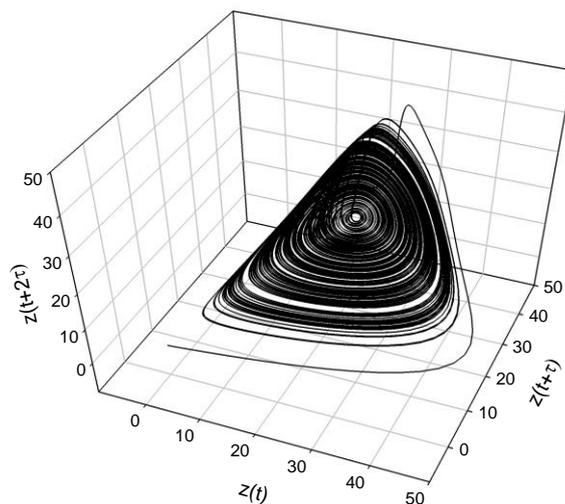
Plotando estes pontos no espaço de fase tridimensional com uma defasagem mais apropriada, obtêm-se claramente as características essenciais do atrator de Lorenz, como nas figuras abaixo:



**FIGURA 11.** Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada x, com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$  segundos).



**FIGURA 12.** Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada Y, com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$  segundos).



**FIGURA 13.** Reconstrução do atrator de Lorenz baseado na série temporal da coordenada  $z$ , com uma defasagem temporal adequada ( $\tau = 0,1$  s).

A Figura 13 revela que a estrutura de lado dobrado do atrator de Rossler está escondida no atrator de Lorenz.

Teoricamente, os atratores estranhos podem ser fielmente reconstruídos usando o procedimento acima. No entanto, trabalha-se em três dimensões, e não se pode esperar que o procedimento possa ser executado quando a dimensão do atrator ultrapassa 3. Nesse caso, um denso subconjunto do espaço tridimensional seria preenchido. No entanto, basta trabalhar em espaços de dimensão superior por meio de vetores. Espaços de quatro, cinco ou mais dimensões sobrecarregam a imaginação visual até mesmo do mais ágil topologista. Mas os sistemas complexos têm muitas variáveis independentes. Sistemas (ambientais), com vários graus de liberdade exigem espaço de fase de dimensões múltiplas (GLEICK, 1989).

Este contexto teórico pode permitir experimentalmente uma análise do comportamento de sistemas complexos reais a partir de uma única variável ao longo do tempo, visto o acoplamento entre elas (ou seja, a influência mútua exercida entre elas) servindo de arcabouço para a modelagem do mesmo.

Este método poderoso é considerado estado atual da arte. (Peitgen, 2004)

## Método de Análise

O método proposto por NICOLIS e PRIGOGINE (1998) para reconstrução da dinâmica de Séries Temporais de Sistemas Complexos tem como meta achar respostas para três perguntas importantes:

Hipótese I - É possível identificar o atrator para uma série temporal dada? Em outras palavras, pode um traço saliente da série temporal deste sistema ser observado tal qual a manifestação de uma dinâmica determinista (possibilitando a mesma complexidade) ou, conter um elemento “estocástico” irreduzível.

Hipótese II - Provido de um atrator, o que é a sua dimensionalidade “ $d$ ”? Sabe-se que a dimensionalidade provê informações valiosas quanto aos sistemas dinâmicos. Por exemplo, se a dimensionalidade for  $d = 1$ , tem-se uma oscilação periódica auto-sustentável; se  $d = 2$ , o sistema apresenta oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes; se  $d$  é um número não-inteiro e maior que 2 (o caso de um atrator fractal), espera-se que o sistema exiba uma oscilação não-periódica devido a uma sensibilidade as condições iniciais, bem como uma imprevisibilidade intrínseca.

Hipótese III - Qual é a dimensionalidade mínima, “ $n$ ”, do espaço de fase dentro do qual o atrator mencionado está embutido? Esta é a definição do número mínimo de variáveis que devem ser consideradas na descrição da dinâmica do sistema, ou seja, o número de variáveis para explicar a variável estudada. Importante ressaltar que  $d$  é necessariamente menor que “ $n$ ”.

Para tanto, o primeiro passo é identificar o conjunto apropriado de variáveis no espaço de fase. Assim como citado no item Reconstrução do Atrator de Lorenz, uma forma muito conveniente de obtenção de variáveis é através do desmembramento da série temporal original em deslocamentos temporais sucessivos com defasagem fixa  $\tau$ . A melhor escolha de  $\tau$  deve apresentar uma independência linear entre a série original e as séries defasadas, ou seja, a menor correlação, no intuito de extrair o máximo de informação possível do sistema estudado. (NICOLIS & PRIGOGINE, 1998)

A reconstrução do atrator com coordenadas de atraso temporal não é um processo automático, logo é importante a escolha de um  $\tau$  apropriado (BAKER & GOLLUB, 1996). PALÚ (2008) usou o método da Informação Mútua (ABARBANEL et al., 1993) para escolher o melhor tempo de defasagem temporal ( $\tau$ ) em análise de dados provenientes de torre micrometeorológica em floresta de transição Amazônia-Cerrado em Sinop - MT, afirmando que um tempo de defasagem de 5 horas pode ser adotado em quaisquer que sejam as análises de séries temporais para a estimativa da dimensionalidade dos processos envolvidos na interação atmosfera-biosfera daquela floresta, independentemente de qual variável estiver sendo estudada e de que época do ano os dados se referem não existindo diferenciação entre as estações. Assim, para se calcular a função correlação (eq. 1), definiu-se para todas as variáveis uma defasagem temporal ( $\tau$ ) igual a 5 h ( $m\Delta t = 20 \times 15$  min, onde  $m$  é um número inteiro e  $\Delta t$  é um intervalo entre sucessivas amostras), visto a baixa correlação entre as séries originais e as séries defasadas. Os resultados de PALÚ (2008) corroboram BAKER & GOLLUB (1996) que a escolha do parâmetro  $\tau$ , em situações práticas, pode ser regulada até que os resultados se tornem satisfatórios. Também que uma pequena variação no valor de tau não é significativa para alterar os resultados obtidos pelo método de análise.

### **Experimento Teórico para Análise de Dados**

Apresenta-se um vetor notação:  $X_1$  posicionado em um ponto no espaço de fase cujas coordenadas são  $\{ X_0(t_i), \dots, X_0 [t_i + (n - 1) \tau ] \}$ . A partir de um ponto de referência  $X_i$  escolhido da série temporal são computadas todas as suas distâncias  $|X_i - X_j|$  a partir de  $N-1$  pontos restantes. Isso nos permite contar os pontos de dados que estão dentro de uma determinada distância,  $r$ , a partir de  $X_i$ , no espaço de fase. Repetindo este processo para todos os valores de  $i$ , chega-se a eq. (1), (GRASSBERGER & PROCACCIA, 1983; NICOLIS & PRIGOGINE, 1989):

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \quad (1)$$

Em que  $\theta$  é a função Heaviside,  $\theta(x) = 0$  se  $x < 0$ , e  $\theta(x) = 1$  se  $x > 0$ . Uma  $C(r)$  não nula mede o grau em que a presença de um ponto de dados  $X_i$  afeta a posição dos outros pontos.  $C(r)$  pode ser referido como a Função Correlação integrante do Atrator.

Fixa-se uma correlação infinitesimal “ $\varepsilon$ ” e a utiliza-se como um critério para sondar a estrutura do Atrator. Se esta é uma linha, o número de pontos dentro de uma sondagem à distância  $r$  de um ponto prescrito deve ser proporcional ao  $r/\varepsilon$ . Se for uma superfície este número deve ser proporcional a  $(r/\varepsilon)^2$  e, mais em geral, se for uma dimensão  $d$  deve ser proporcional a  $(r/\varepsilon)^d$ . Espera-se, portanto, que, para  $r$  relativamente pequeno,  $C(r)$  deverá variar conforme...

$$C(r) \sim r^d \quad (2)$$

Em outras palavras, a dimensionalidade “ $d$ ” de um atrator é dada pela declinação  $\ln C(r)$  por  $\ln r$  para uma certa distância de  $r$ :

$$\ln C(r) = d \ln r \quad (3)$$

Os raciocínios acima sugerem o seguinte algoritmo:

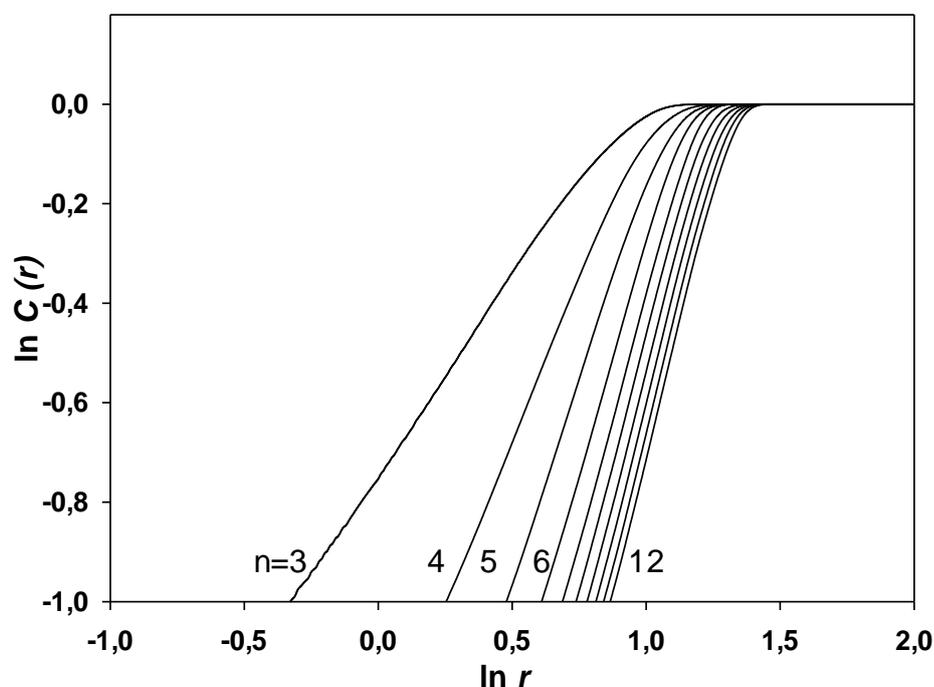
Passo I. Começando por uma dada série temporal construir a função correlação, eq. (1), para vários valores de “ $n$ ” no espaço de fase e com  $r$  variando de um mínimo a um máximo. É importante uma interpretação física da equação (1). Centra-se a hipersfera em um dos pontos da trajetória do atrator,  $X_i$ . O número de outros pontos dentro do atrator da hipersfera são contados.  $X_i$  são os pontos sobre a trajetória de referência e  $X_j$  são outros pontos no atrator nas proximidades de  $X_i$ . A notação  $|X_i - X_j|$  é a distância de separação entre os dois pontos. Da notação  $\theta(r - |X_i - X_j|)$  resulta um valor de unidade, se a distância entre os dois pontos é menor que o raio da hipersfera, caso contrário um valor de zero é resultado. Desta forma, a função Heaviside conta todos os pontos dentro da hipersfera. A seguir, calcula-se a soma de correlação da equação envolvendo a trajetória de referência, parando em cada ponto discreto sobre essa trajetória e contando o número de pontos do atrator que estão dentro da hipersfera de raio  $r$ . A soma cumulativa de todos os pontos contados é então dividido por  $N^2$  para dar a soma de correlação,  $C(r)$ . O valor

máximo de  $C(r)$  é a unidade e este máximo é atingido quando o raio da hipersfera de sondagem é maior do que o maior diâmetro do atrator e todos os pontos são contados. O valor mínimo de  $C(r)$  é alcançado quando os dois pontos mais próximos no atrator são contados. Observa-se que a soma da correlação conta os vizinhos mais próximos durante as visitas de sondagem da hipersfera na sua viagem ao redor do atrator.

Passo II. Se deduz o grau de inclinação “ $d$ ” próximo da origem para a eq. (3) e observa-se como o resultado varia com “ $n$ ” aumentado. Assim, ao examinar o atrator para diferentes raios de hipersfera numa escala um mínimo a um máximo, a dimensão de correlação é obtida a partir da inclinação do segmento de várias parcelas  $\ln(r)$  versus  $\ln C(r)$  parcelas. Em geral, boas estimativas da dimensão de correlação requerem um grande número de dados, porém o tempo computacional necessário para calcular os aumentos de  $C(r)$  aumentam exponencialmente. Quando  $r$  se aproxima de seu valor máximo, a curva  $\ln(r)$  versus  $\ln C(r)$  começa a desaparecer, tornando-se horizontal à medida que novos raios da hipersfera não aumentam a soma da correlação. Como esse procedimento é repetido para vários  $n$  no espaço de fase, apresenta-se um sucessão de seguimentos parecidos sucessivos joelhos que tendem saturar-se com o aumento de  $n$ , se for o caso da série temporal possuir um atrator. Entre os raios hipersfera máxima e mínima, a curva de  $\ln(r)$  Vs  $\ln C(r)$  torna-se linear e essa inclinação é igual à dimensão de correlação, a dimensionalidade fractal do atrator.

Passo III. Se a dependência de “ $d$ ” versus “ $n$ ” está saturada além de um valor “ $n$ ” relativamente pequeno, o sistema representado pela série temporal possuirá um atrator. O valor de saturação de “ $d$ ” é estimado como sendo a dimensionalidade do atrator representado pela série temporal. Dos valores de “ $n$ ” saturados obtêm-se o número mínimo de variáveis necessárias para modelar o comportamento representado pelo atrator.

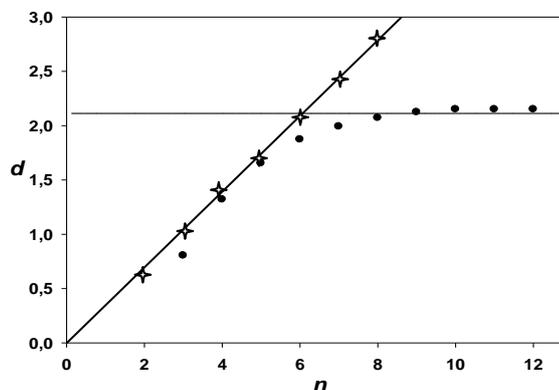
Aplicação do Passo I. Com o programa (HEAVI C++ Versão 1.0) construído pelo grupo de pesquisadores da Pós Graduação em Física Ambiental, calculou-se a Função Correlação eq. (1). Os dados de entrada são: a série temporal a ser analisada; o tempo de defasagem  $\tau$  para a reconstrução do atrator; o valor “n” número de graus de liberdade no qual será imergido o atrator; e os valores mínimo e máximo do raio  $r$  da hipersfera de sondagem. Os graus de liberdade utilizados no espaço de fase foram de três ( $n = 3$ ) até doze ( $n = 12$ ), e os resultados são plotados assim como na figura 14 “ $\ln C(r)$ ” versus “ $\ln r$ ”, também chamado de gráfico “knee”, ou joelhos, devido sua forma que lembra sucessivos joelhos.



**FIGURA 14.**  $\ln C(r)$  vs  $\ln r$  para difentes valores de dimensões do espaço de fase.

Enquanto “n” aumenta, as segmentos de reta tendem a uma saturação, e essa tendência a saturar se deve ao comportamento determinístico oculto na série temporal analisada. É possível observar a existência de uma dependência linear em concordância com a equação eq. (3). A partir da existência dessa extensa gama de linearidades quase paralelas, a dimensionalidade do atrator pode ser inferida com uma regressão linear simples desse segmento de reta.

Aplicação do Passo II. Obtêm-se o grau de inclinação das extensões lineares de cada uma das correlações plotadas acima e, por sua vez, plota-se “ $d$ ” para cada “ $n$ ” respectivo, como na Figura 15 a seguir:



**FIGURA 15.** Dependência da dimensão de correlação “ $d$ ”(dimensionalidade fractal) quanto ao número das variáveis (graus de liberdade) no espaço de fase “ $n$ ” para o atrator climático (°) e para um sinal de ruído branco (x).

Aplicação do Passo III. Para a dinâmica climática observa-se a saturação dos resultados das correlações para diferentes valores de “ $n$ ”. Isto estabelece uma clara diferença entre dinâmica climática e ruídos aleatórios (na qual não existe tendência à saturação e “ $d$ ” acaba por ser igual a “ $n$ ”), e ainda fornece fortes evidências de que a série temporal de dados microclimatológicos pode ser vista como a manifestação de uma dinâmica determinista possuindo um atrator de baixa dimensionalidade. Dos pontos na figura 15 infere-se que o grau de inclinação alcança um valor de saturação em aproximadamente  $n = 8$  (dimensionalidade mínima no espaço de fase necessária para a compreensão da variável), o qual é  $d \sim 2,1$  (dimensionalidade fractal, ou dimensão de correlação do atrator climático). O atrator deste sistema apresenta características de sensibilidade às condições iniciais, oscilações quase periódicas de duas frequências independentes com tendência a uma oscilação não-periódica, e uma imprevisibilidade intrínseca.

O método mais amplamente utilizado para estimar a dimensão fractal de atratores é o da dimensão de correlação, que embora seja computacionalmente eficiente em comparação com outros métodos (quando implementado como um algoritmo) (ADDISON, 1997) ainda é relativamente demorado.

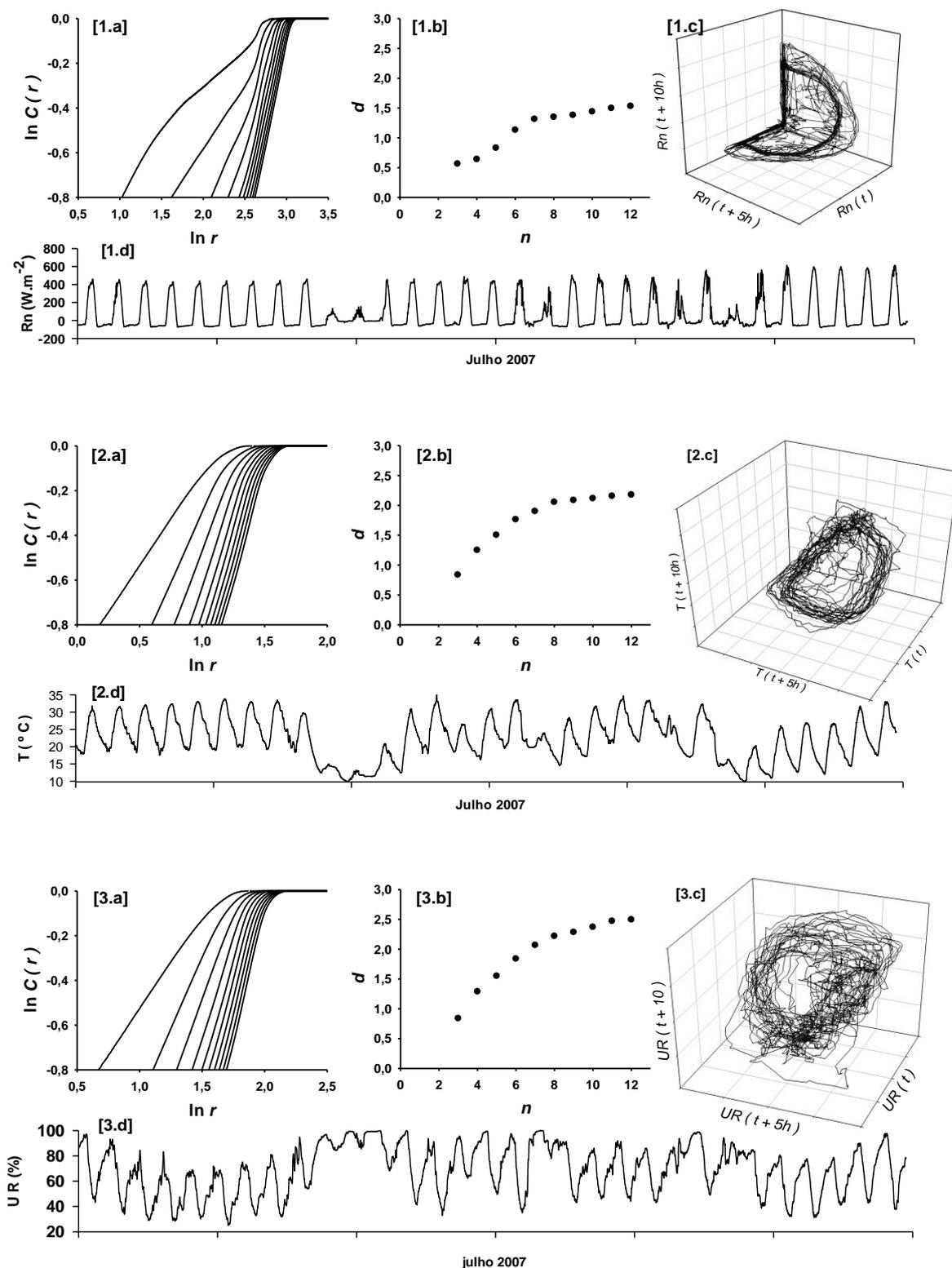
Em computadores pessoais, o cálculo para a equação (1) para a série temporal de um mês (uma única variável) com  $n = 3$  dura aproximadamente 2 horas, o tempo de cálculo aumenta diretamente proporcional ao  $n$  chegando até aproximadamente 4 horas para  $n = 12$ .

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

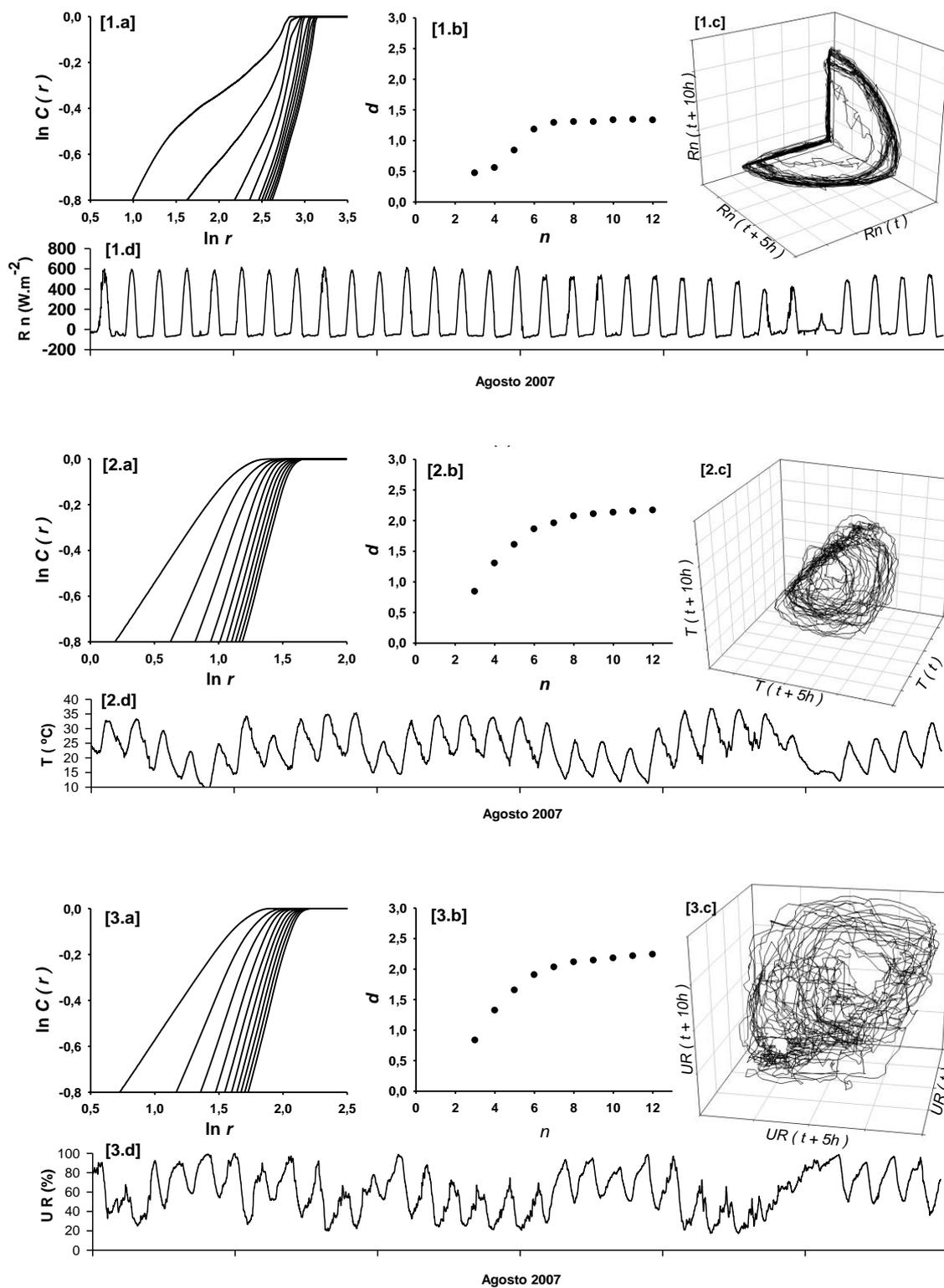
### RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO ALGORÍTMO

Neste Capítulo são apresentadas sequencialmente em cada figura as linhas de  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (gráfico “Joelhos”) para diferentes dimensões no espaço de fase; a tendência da dimensão embutida ( $d$ ) com o aumento dos graus de liberdade no espaço de fase ( $n$ ); uma projeção tridimensional do atrator reconstruído no espaço de fase de defasagens temporais ( $\tau = 5$  horas), e a série temporal do mês específico (variável versus tempo), respectivamente para as variáveis Balanço de Radiação ( $R_n$ ), Temperatura do ar ( $T$ ) e Umidade Relativa do Ar ( $UR$ ).

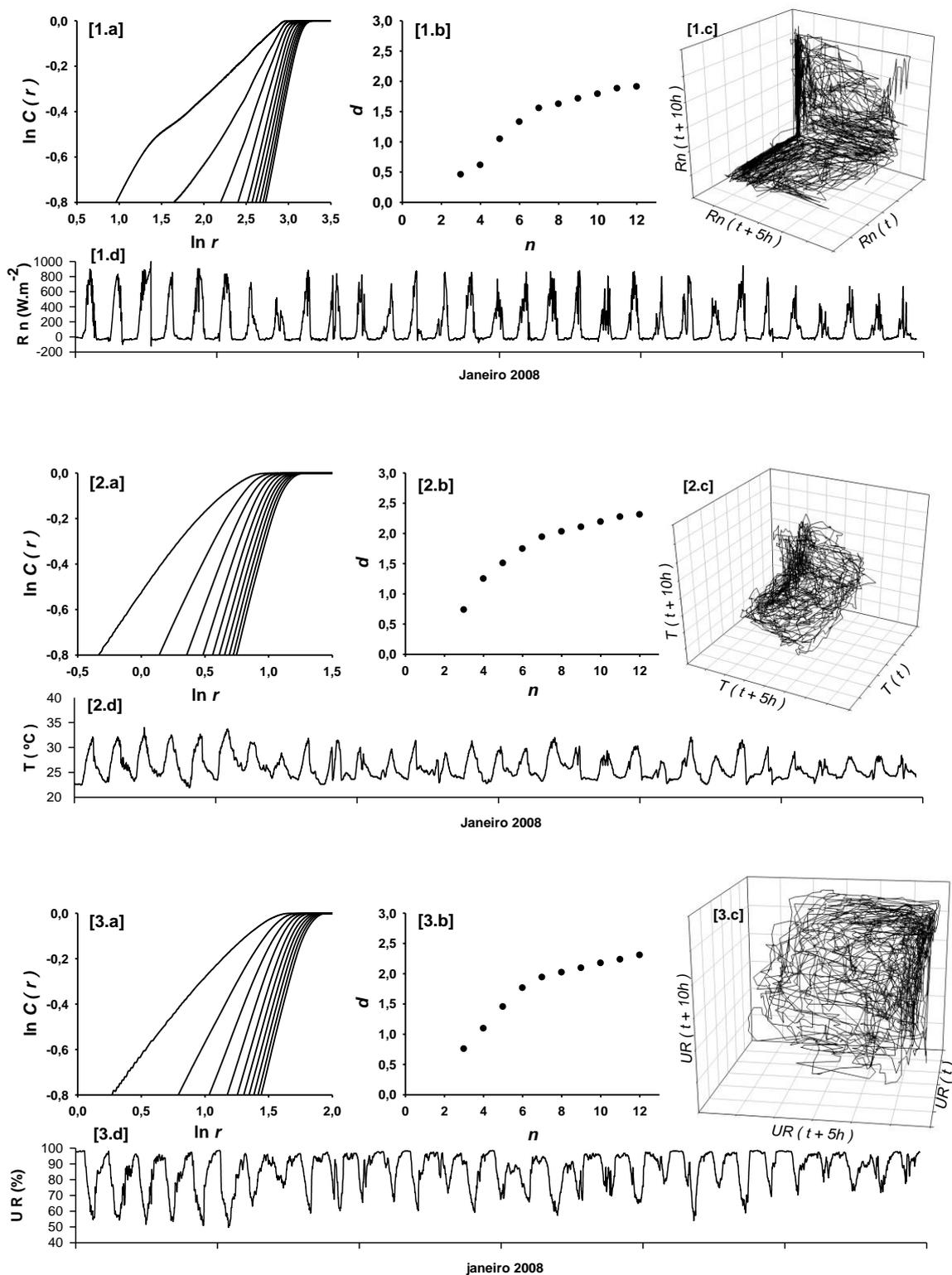
Reforça-se que o método aplicado nesta análise serve para dar suporte informacional sobre o sistema investigado, visando uma possível futura modelagem, e que os dados analisados são referentes a um sistema microclimático que é um sistema não linear. Sistemas não lineares são de difícil modelagem (a exemplo o modelo de Lorenz que possui três variáveis), assim, estipulou-se o uso de valores de  $n$  entre 3 e 12, pois para séries temporais que não saturam com valores de  $n$  até 12 (ou seja, 12 variáveis para a sua explicação) presume-se serem extremamente complexas, permitindo considerar a sondagem como suficiente.



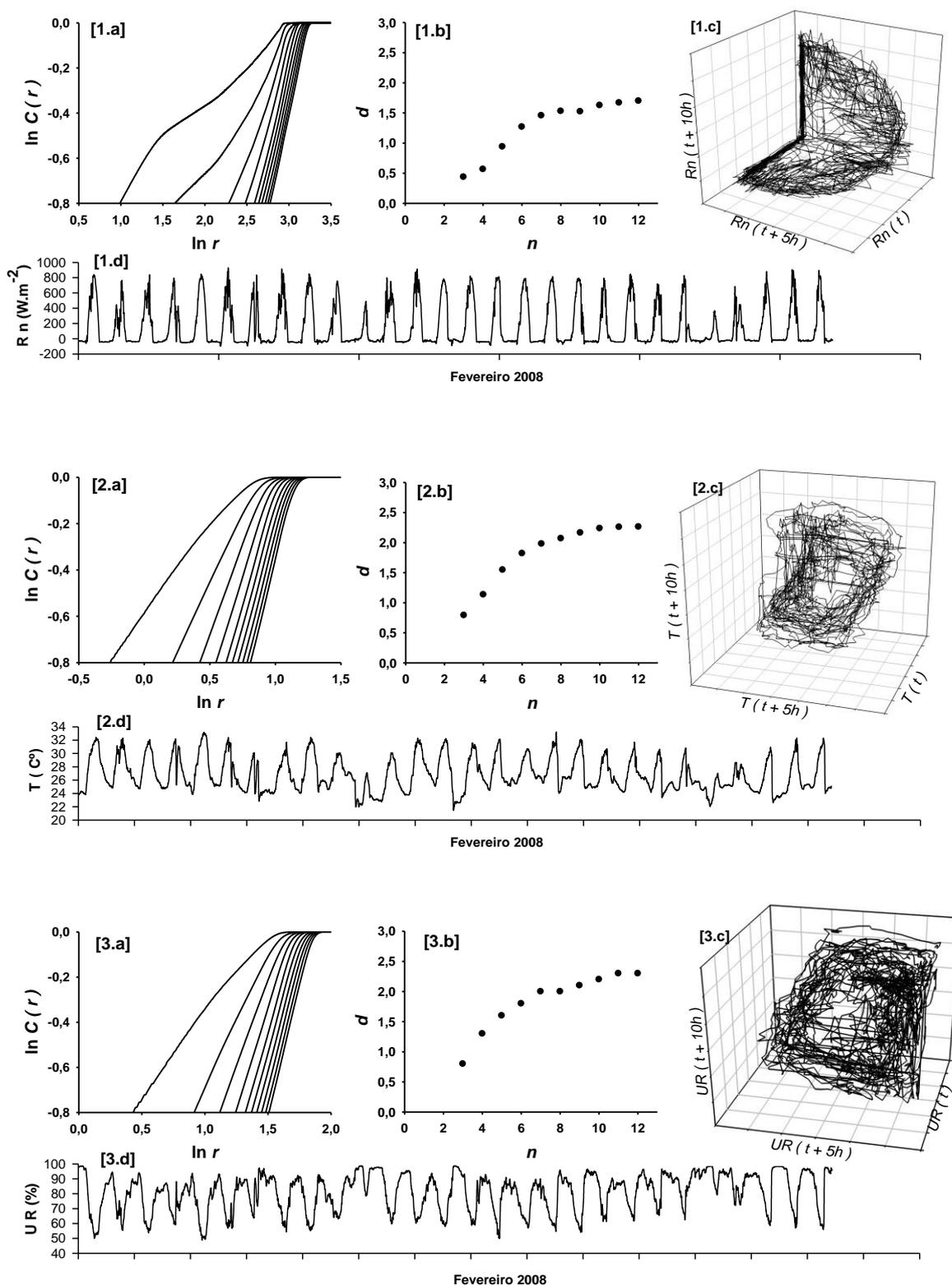
**FIGURA 16.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período seco, julho de 2007.



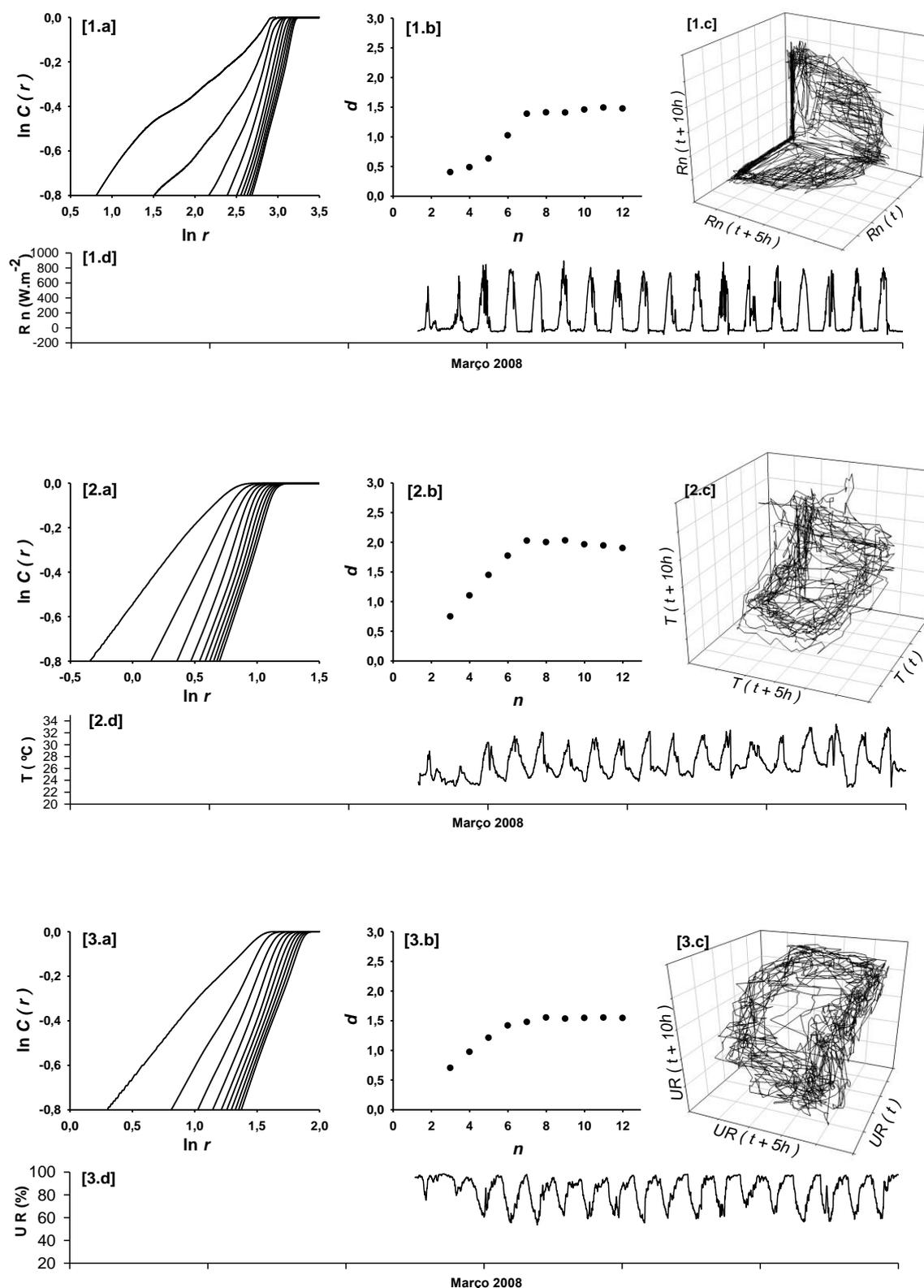
**FIGURA 17.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período seco, agosto de 2007.



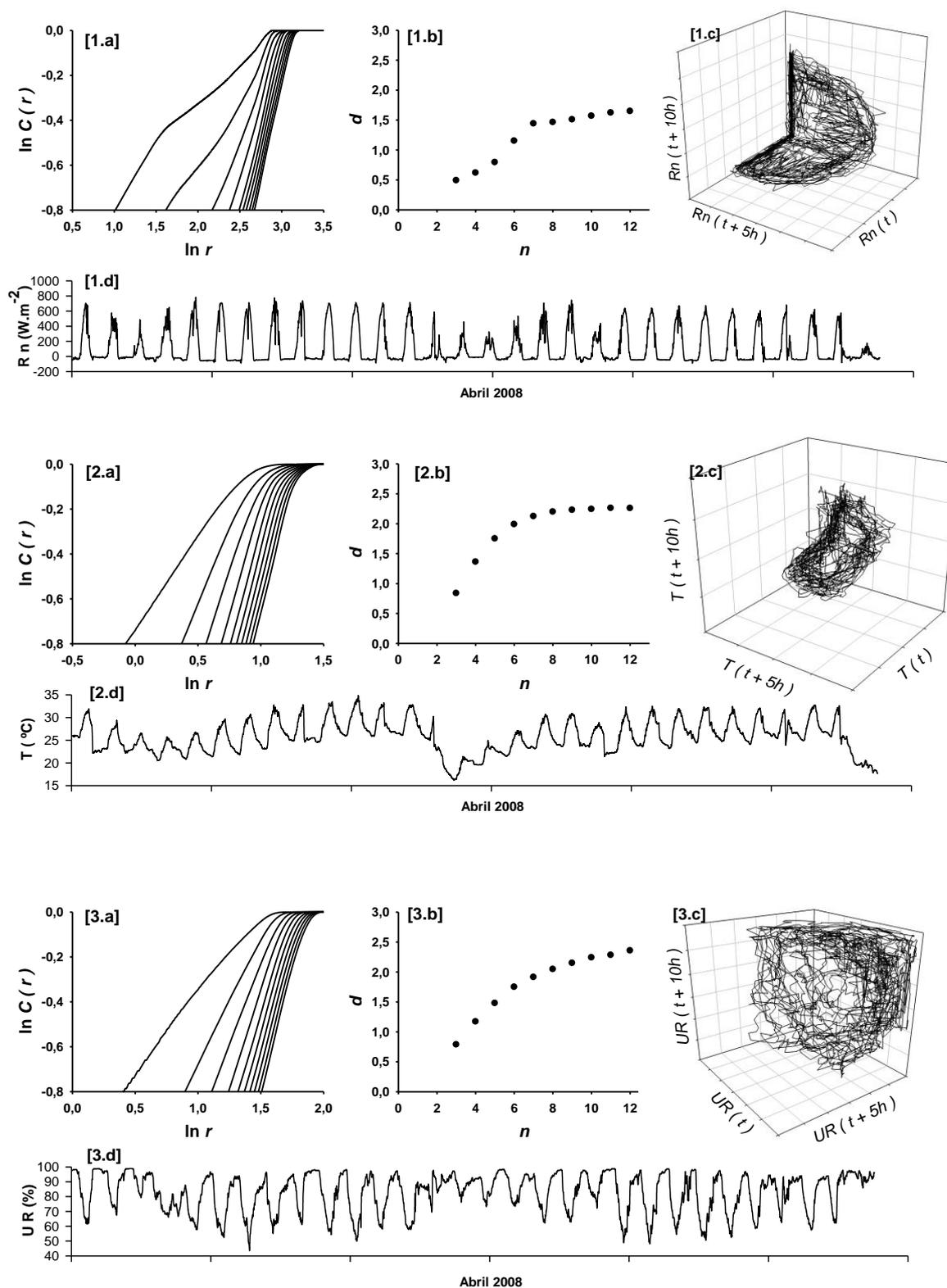
**FIGURA 18.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $Rn$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período chuvoso, janeiro de 2008.



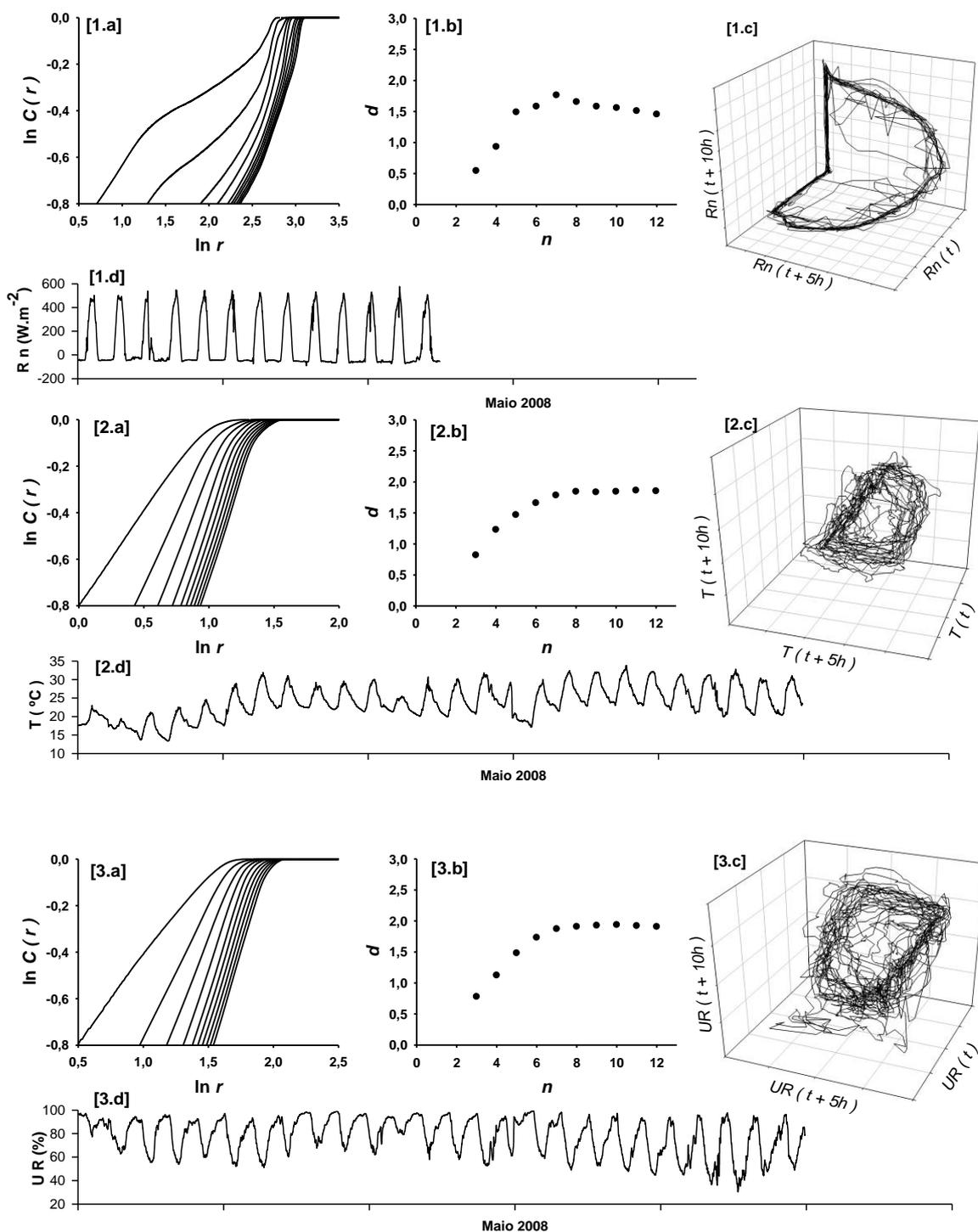
**FIGURA 19.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período chuvoso, fevereiro de 2008.



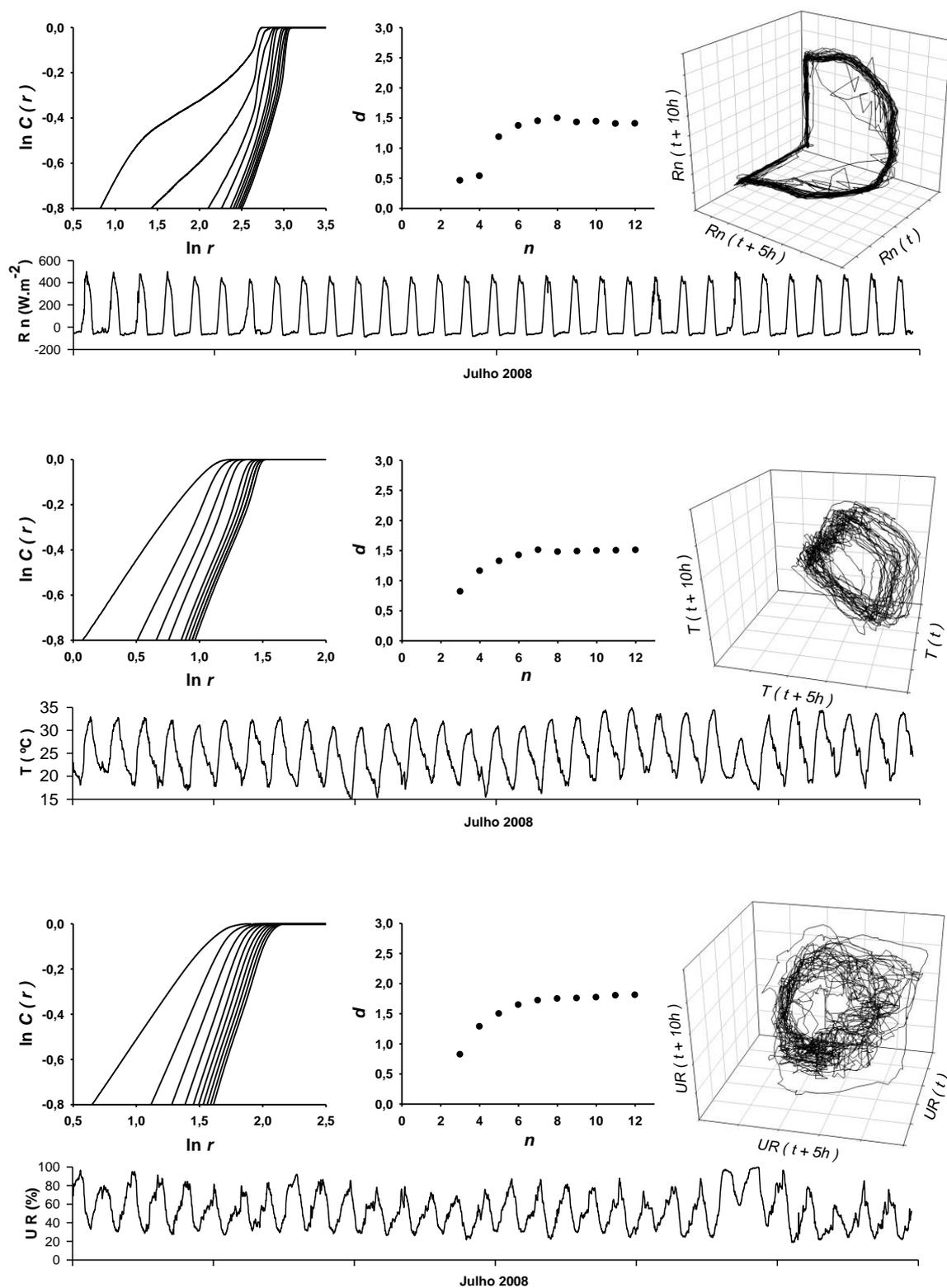
**FIGURA 20.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, março de 2008.



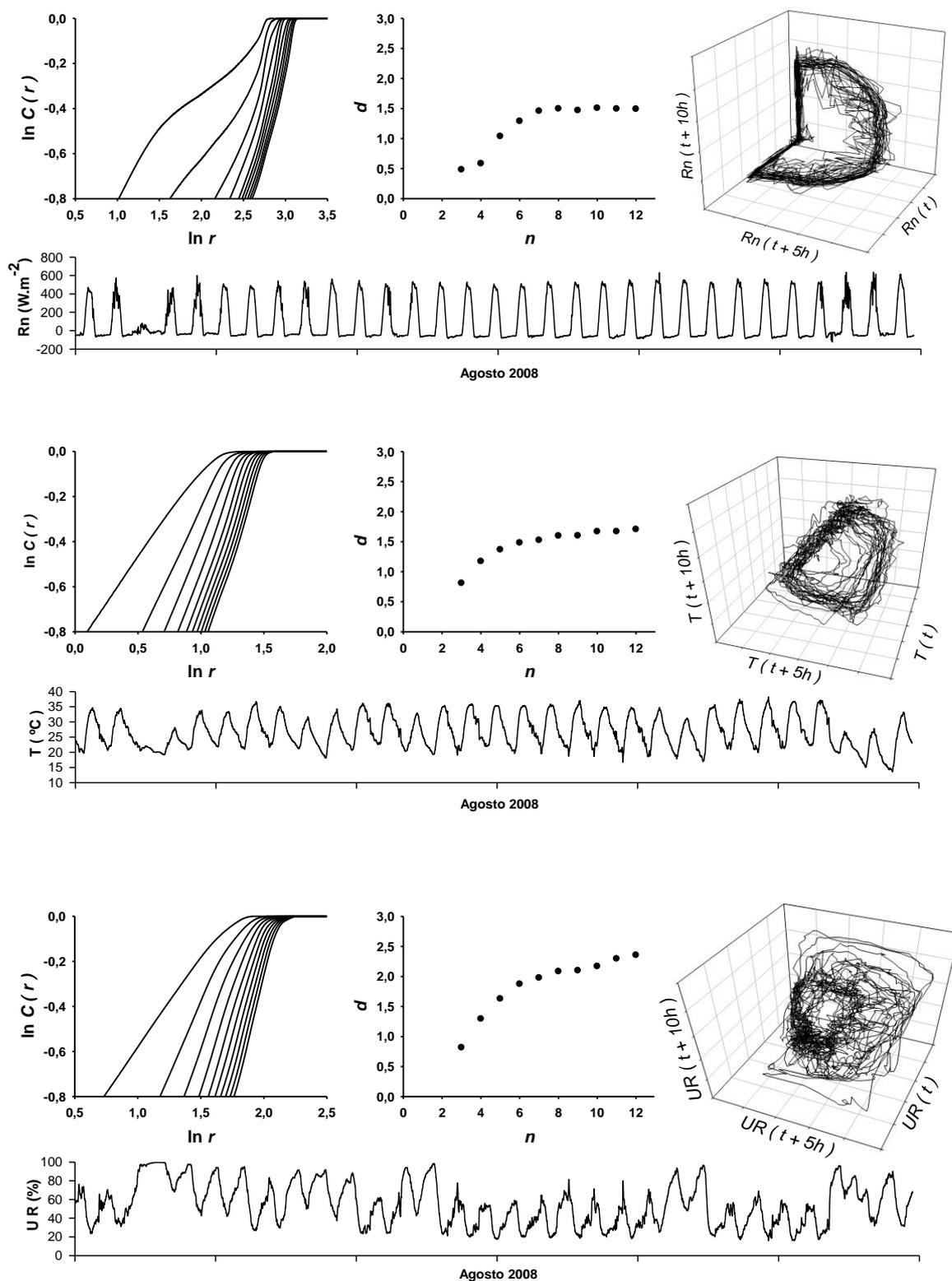
**FIGURA 21.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, abril de 2008.



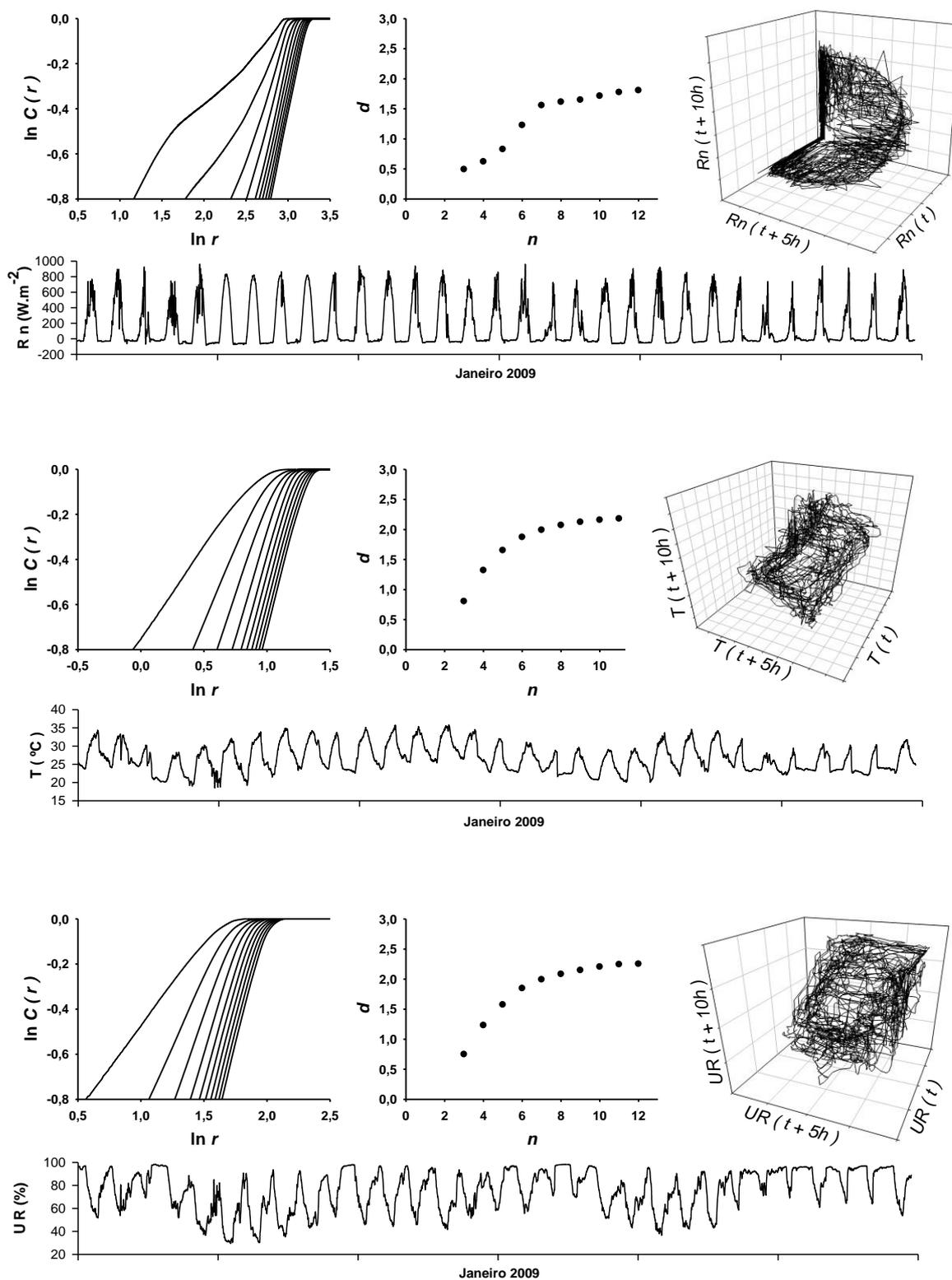
**FIGURA 22.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, maio de 2008.



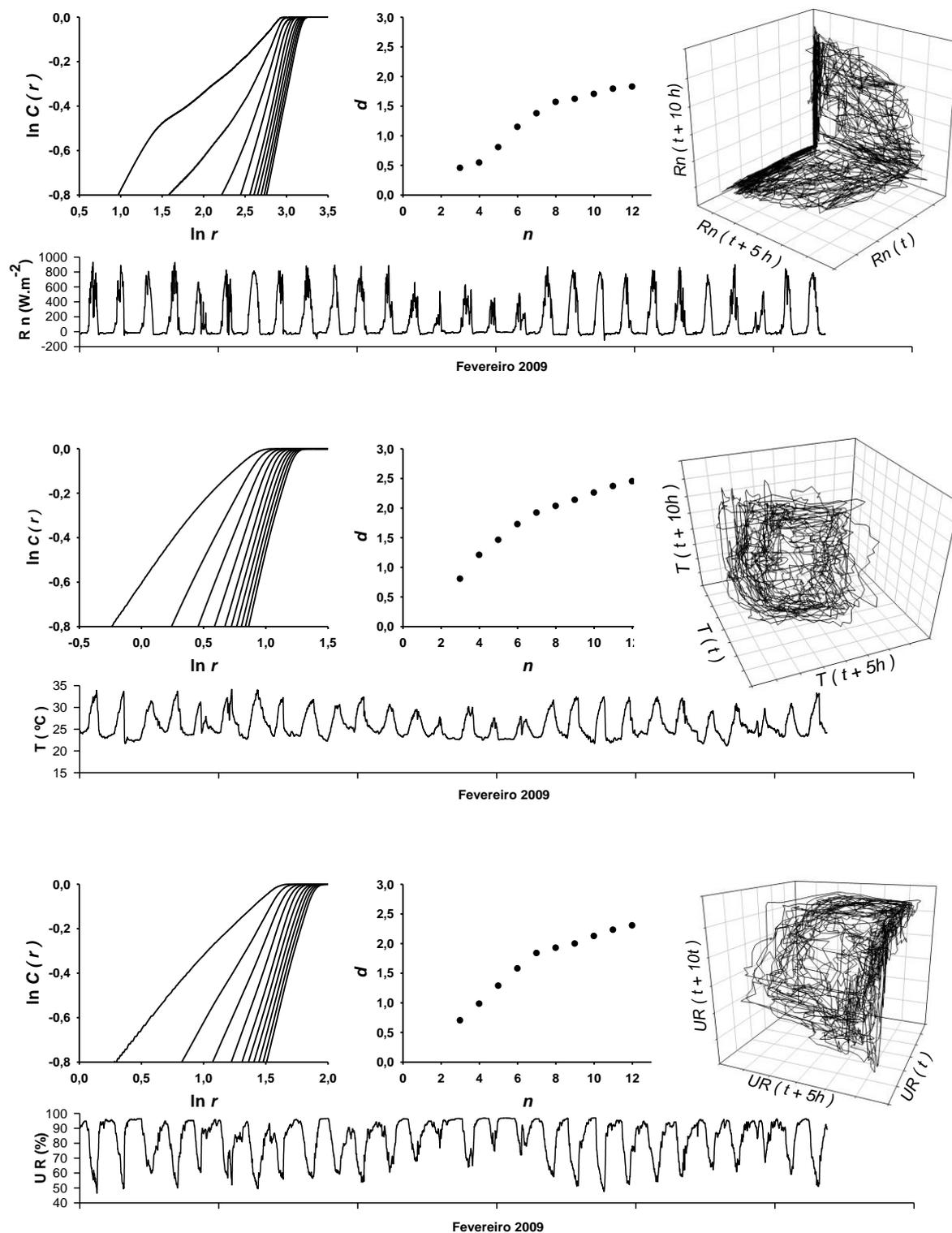
**FIGURA 23.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período seco, julho de 2008.



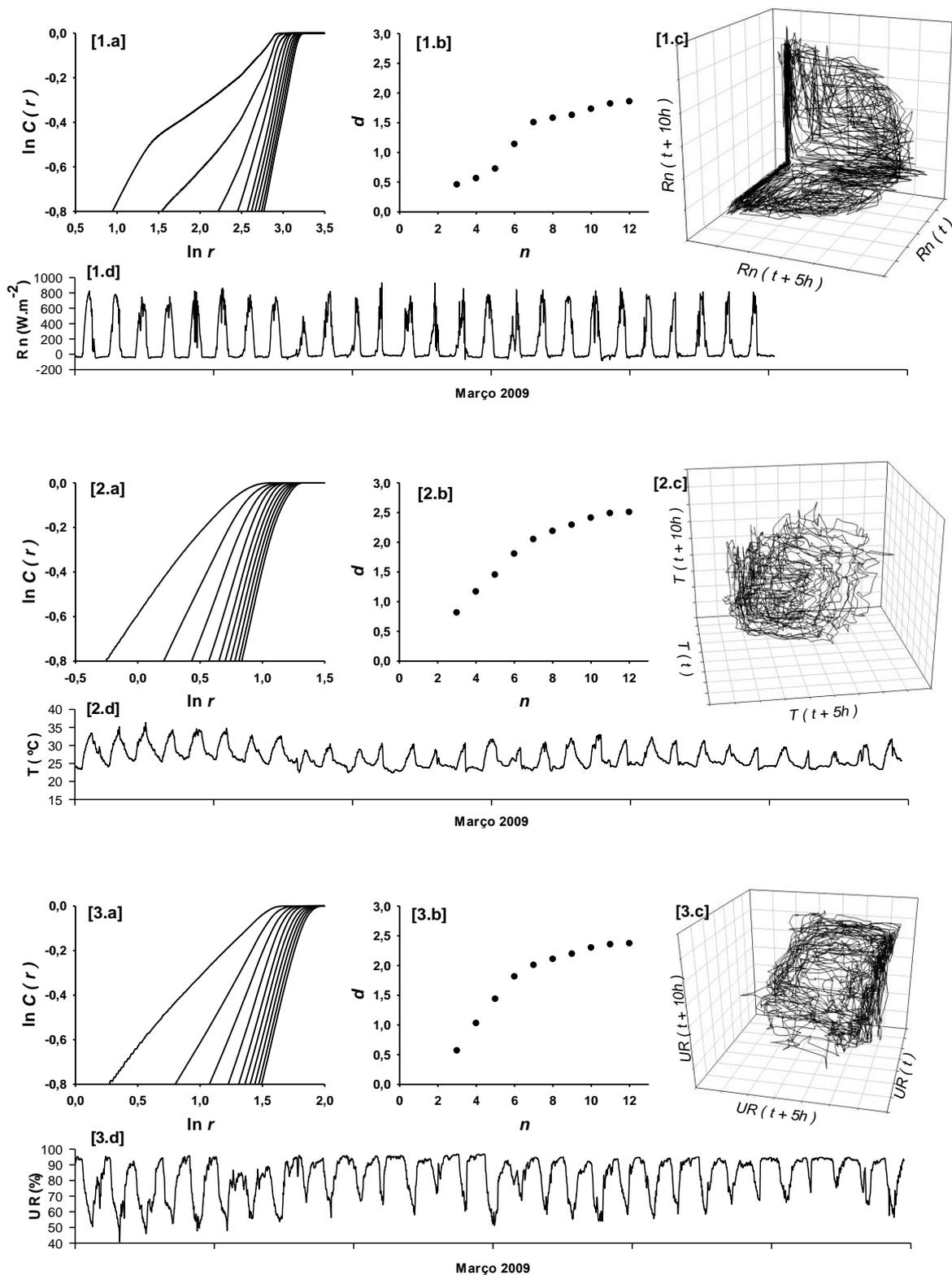
**FIGURA 24.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período seco, agosto de 2008.



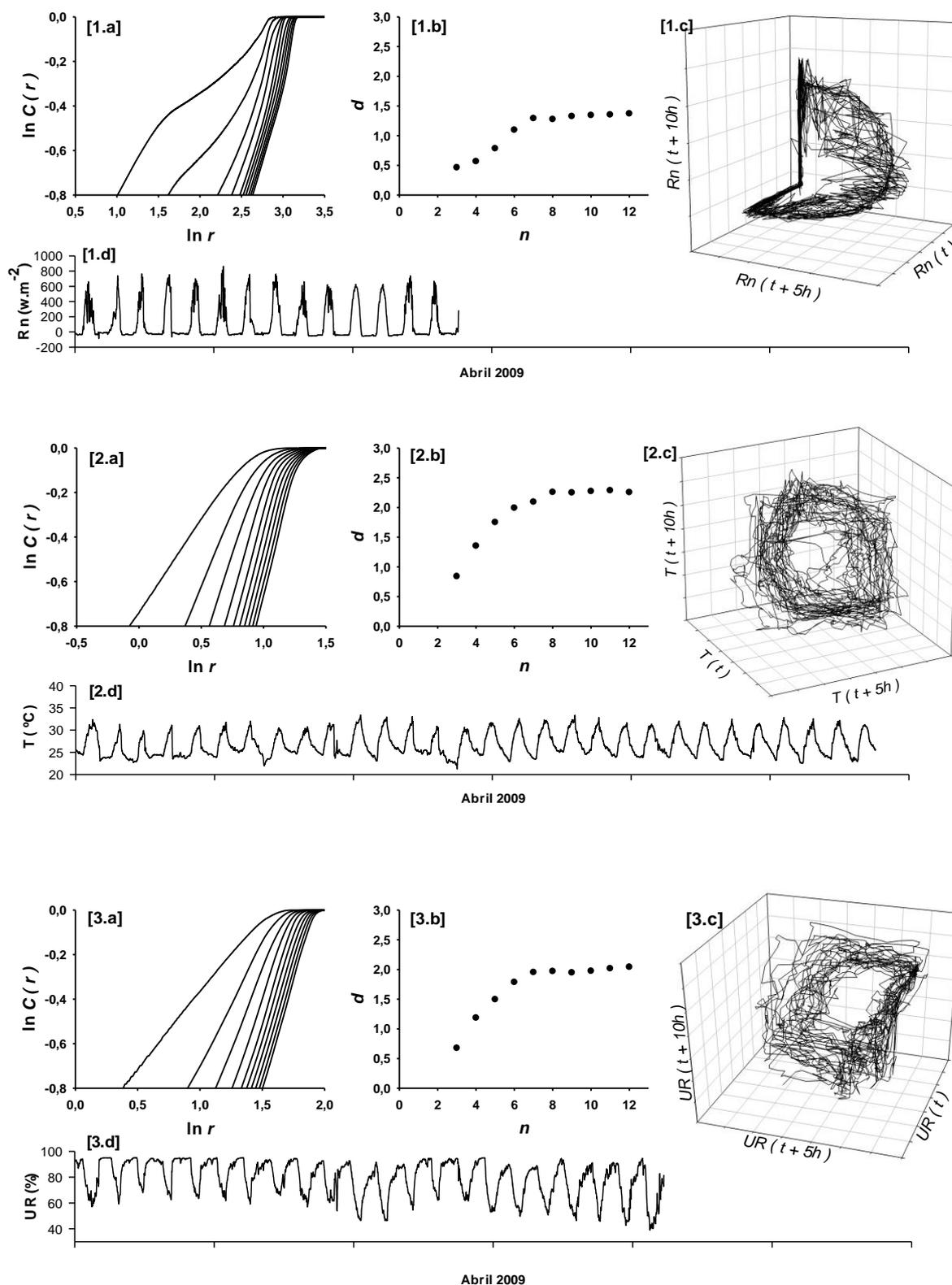
**FIGURA 25.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período chuvoso, janeiro de 2009.



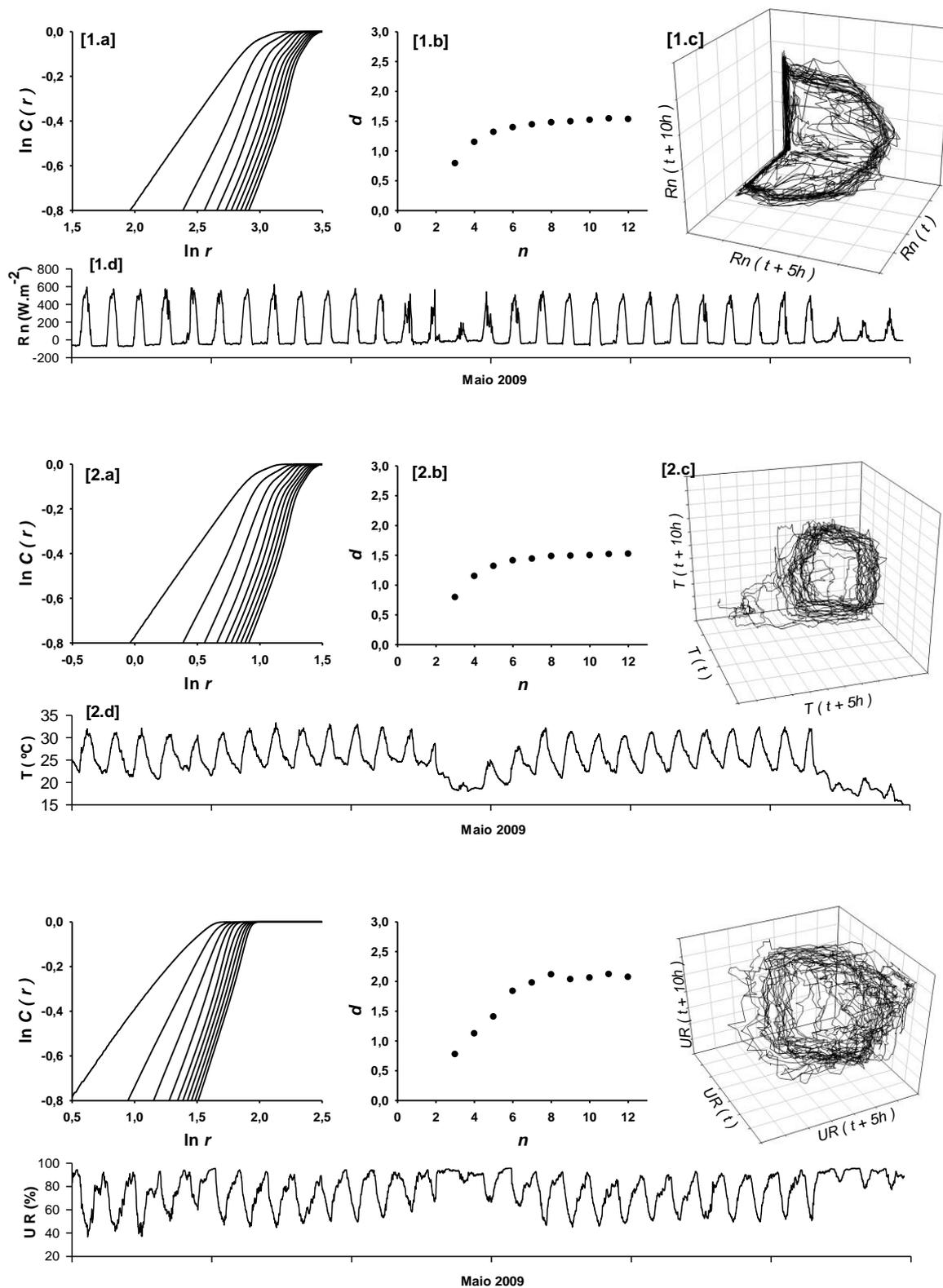
**FIGURA 26.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período chuvoso, fevereiro de 2009.



**FIGURA 27.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  ("Joelhos"), (b) dimensionalidade "d" quanto ao número das variáveis do espaço de fase "n", (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, março de 2009.



**FIGURA 28.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “d” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “n”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, abril de 2009.



**FIGURA 29.** (a)  $\ln C(r)$  versus  $\ln r$  (“Joelhos”), (b) dimensionalidade “ $d$ ” quanto ao número das variáveis do espaço de fase “ $n$ ”, (c) reconstrução do atrator climático, (d) série temporal, respectivamente para as variáveis (1)  $R_n$ , (2)  $T$  e (3)  $UR$ , período inundado, maio de 2009.

## DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO (DIMENSIONALIDADE FRACTAL DO ATRATOR) [“d”]

Neste capítulo são apresentados os resultados quanto à dimensionalidade fractal dos atratores, ou seja, a dimensão de correlação (Tabela 2), e a classificação destes valores quanto às suas características, que podem ser periódicas, quase-periódicas ou não-periódicas (Tabela 3).

**TABELA 2.** Valores da dimensionalidade fractal ( $d$ ) dos atratores das variáveis Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR), obtidas dos gráficos “joelhos” [componentes (b) das Figuras 15 a 28] a partir da saturação de  $d$  versus  $n$ , com 12 graus de liberdade ( $n = 12$ ) no espaço de fase.

| Seca 2007    |     |     |     | Seca 2008    |     |     |      |
|--------------|-----|-----|-----|--------------|-----|-----|------|
| Mês/Variável | Rn  | T   | UR  | Mês/Variável | Rn  | T   | UR   |
| Julho        | 1,5 | 2,2 | 2,5 | Julho        | 1,4 | 1,5 | 1,8  |
| Agosto       | 1,3 | 2,2 | 2,2 | Agosto       | 1,5 | 1,7 | 2,4* |

| Chuva 2008   |     |     |      | Chuva 2009   |     |      |      |
|--------------|-----|-----|------|--------------|-----|------|------|
| Mês/Variável | Rn  | T   | UR   | Mês/Variável | Rn  | T    | UR   |
| Janeiro      | 1,9 | 2,3 | 2,3* | Janeiro      | 1,8 | 2,2  | 2,3  |
| Fevereiro    | 1,7 | 2,3 | 2,3  | Fevereiro    | 1,8 | 2,4* | 2,3* |

| Inundação 2008 |     |     |      | Inundação 2009 |     |     |     |
|----------------|-----|-----|------|----------------|-----|-----|-----|
| Mês/Variável   | Rn  | T   | UR   | Mês/Variável   | Rn  | T   | UR  |
| Março          | 1,5 | 2   | 1,5  | Março          | 1,9 | 2,5 | 2,4 |
| Abril          | 1,6 | 2,3 | 2,4* | Abril          | 1,4 | 2,3 | 2   |
| Maió           | 1,6 | 1,9 | 1,9  | Maió           | 1,5 | 1,5 | 2,1 |

(\*Valores não-estabilizados no espaço de fase com 12 graus de liberdade ( $n = 12$ ), considerando uma aproximação de intervalo  $\pm 0,05$ .)

Os resultados da dimensionalidade fractal (saturação de  $d$  versus  $n$ ) para a variável Balanço de Radiação (Rn) saturou-se em todos os meses analisados mantendo-se entre  $1 < d < 2$ . Estes resultados possibilitam inferir que, dentre as séries temporais das variáveis analisadas e períodos considerados, o Balanço de Radiação (Rn) é a variável mais simples de ser modelada no Cambarazal/Pantanal Matogrossense. Houve variabilidade sazonal do Balanço de Radiação (Rn), com os

maiores valores de “ $d$ ” no período chuvoso e os menores no período seco, o que está de acordo com a declinação solar anual, em que a média mínima de  $R_n$  é em junho, e máxima é em dezembro (OMETTO, 1981). A nebulosidade implica variabilidade no padrão da série temporal do Balanço de Radiação ( $R_n$ ), e conseqüentemente suas maiores dimensionalidades fractais no período chuvoso. O inverso se verifica no período seco.

A série temporal da variável Temperatura do Ar ( $T$ ) apresentou um atrator com dimensionalidade  $d > 2$  no período chuvoso, não estabilizando em fevereiro de 2009. Os períodos inundados foram marcados por  $d \geq 2$  nos dois primeiros meses e  $d < 2$  no terceiro mês. Ressalta-se que Temperatura do Ar ( $T$ ) é um dos efeitos mais importantes da radiação solar, e que o aquecimento da atmosfera próxima à superfície terrestre ocorre principalmente por transporte de calor a partir do aquecimento da superfície pelos raios solares.

As variações temporais e espaciais da temperatura do ar são condicionadas pelo balanço de energia na superfície. Assim, todos os fatores que afetam o balanço de energia na superfície influenciam também a temperatura do ar. (PEREIRA, 2002).

Nas séries temporais de  $R_n$  observa-se picos próximos a  $1000 \text{ W.m}^{-2}$  no período chuvoso e picos próximos a  $500 \text{ W.m}^{-2}$  no período seco. A variação sazonal da dimensionalidade (ou seja, diminuição de  $d$  ao final do período inundado) está estreitamente ligada ao balanço de energia do ecossistema (no que diz respeito ao aspecto astronômico de irradiação solar) manifestando-se nas diferentes médias de temperatura durante o ano.

No período seco de 2007 (figuras 15 e 16), a dimensionalidade foi  $d > 2$ , e no período seco de 2008 foi  $d < 2$ . A análise desses resultados relaciona-se com a dinâmica atmosférica global, que durante os meses de maio a setembro (como maior prevalência em julho e agosto) ocorre uma intensificação no mecanismo de produção de massas de ar frio nas imediações do pólo Sul, deslocando-se no sentido sul-norte. Essas frentes frias, por vezes acompanhadas de nebulosidade, passam a atingir regiões de clima subtropical, tropical e, até mesmo equatorial, promovendo quedas bruscas na temperatura normalmente acompanhadas de ventos frios. Nessas ocasiões,

regiões com médias anuais de temperatura extremamente elevadas podem apresentar subitamente quedas para patamares muito baixos, geralmente com duração de quatro a cinco dias. Em Cuiabá, a mínima pode atingir níveis inferiores a 5°C (BRASIL, 2003). A partir das séries temporais dos períodos secos analisados é possível observar que houve a chegada de frentes frias durante a seca 2007, e que esta promoveu uma oscilação da amplitude térmica diária (variando subitamente de 18 e 32°C para aproximadamente 10 e 15°C), das temperaturas mínimas e máximas e da insolação durante alguns dias. Isto deslocou a trajetória dos estados do atrator no espaço de fase, o qual migrou de uma frequência periódica à amplitudes e frequências subjacentes. Infere-se que desprezando esses estados eventuais e de pouca duração do período seco de 2007, o sistema apresentaria dimensionalidade “ $d$ ” muito próximo ao do período seco de 2008.

As séries temporais de Temperatura do Ar (T) dos períodos chuvosos e parte dos períodos inundados, embora resultaram em  $d > 2$ , caracterizaram-se por amplitude térmica menor do que o período seco (mesmo com mais energia no sistema) devido à maior Umidade Relativa do Ar (UR), considerando-se o alto calor específico da água e seu papel regulador dos ecossistemas e clima global.

A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou  $d > 2$  no período chuvoso, não se estabilizando em janeiro de 2008 e fevereiro de 2009. O período seco de 2007 apresentou  $d > 2$ , enquanto o período seco de 2008 oscilou do mês julho com  $d < 2$  para agosto com  $d > 2$  não-estabilizado. O período inundado de 2008 configurou-se oscilante nos seus três meses, sendo  $d < 2$ ,  $d > 2$  não-estabilizado e  $d < 2$ . A inundação 2009 apresentou  $d \geq 2$ . Esta variável foi a que apresentou o maior número de insaturações, verificando-se em quatro dos seis períodos analisados. As séries temporais da variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentaram dependência inversa em relação à temperatura, atingindo seus valores mínimos nas horas mais quentes do dia, (PEREIRA, 2002). A amplitude dos valores de UR foi maior na seca (de 20 à 100%) do que na chuva (50% à 100%), mas os valores da dimensionalidade fractal tiveram pouca variação sazonalmente.

O ambiente do Pantanal Matogrossense parece apresentar atratores temporais (ou climáticos) não-periódicos de baixa dimensionalidade com pouca variabilidade

variação sazonal, demonstrando estabilidade ecossistêmica. Os resultados desta análise corroboram pesquisas com dados de diversas estações ao redor do globo, que encontraram uma baixa dimensionalidade caótica para o atrator da temperatura (SIVAKUMAR, 2004).

**TABELA 3.** Classificação das variáveis quanto ao comportamento: Periódico (I), Quase-Periódico (II) e Não-Periódico (III).

| <b>Seca 2007</b>    |           |          |           | <b>Seca 2008</b>    |           |          |           |
|---------------------|-----------|----------|-----------|---------------------|-----------|----------|-----------|
| <b>Mês/Variável</b> | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b> | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Julho               | I         | III      | III       | Julho               | I         | I        | I         |
| Agosto              | I         | III      | III       | Agosto              | I         | I        | III       |

| <b>Chuva 2008</b>   |           |          |           | <b>Chuva 2009</b>   |           |          |           |
|---------------------|-----------|----------|-----------|---------------------|-----------|----------|-----------|
| <b>Mês/Variável</b> | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b> | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Janeiro             | II        | III      | III       | Janeiro             | I         | III      | III       |
| Fevereiro           | I         | III      | III       | Fevereiro           | I         | III      | III       |

| <b>Inundação 2008</b> |           |          |           | <b>Inundação 2009</b> |           |          |           |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------------------|-----------|----------|-----------|
| <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Março                 | I         | II       | I         | Março                 | II        | III      | III       |
| Abril                 | I         | III      | III       | Abril                 | I         | III      | II        |
| Maio                  | I         | II       | II        | Maio                  | I         | I        | II        |

(Optou-se por uma aproximação para  $d = 2$  considerando intervalo de  $\pm 0,1$ )

A classificação quanto ao comportamento da variável Balanço de Radiação (Rn) para o período seco apresentou oscilação periódica auto-sustentável. O mesmo observa-se para o período inundado, exceto para março de 2009, em que o valor  $d = 1,9$  foi aproximado para  $d = 2$ . O período chuvoso, com valores  $d$  mais próximos de 2 caracterizou-se como tendendo de uma oscilação periódica auto-sustentável para oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes.

O comportamento da variável Temperatura do Ar (T) para o período chuvoso apresentou oscilação não-periódica e imprevisibilidade intrínseca. O mesmo ocorreu com o período seco de 2007. Já o período seco de 2008 apresentou oscilação periódica auto-sustentável. O período inundado foi marcado em 2008 por oscilações

quase-periódicas de duas frequências independentes e não-periódicas, e 2009 por oscilações não-periódicas tendendo a uma oscilação periódica auto-sustentável.

A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou oscilações não-periódicas em todos os períodos, principalmente no período chuvoso, em que todas as classificações foram marcadamente não-periódicas. No período seco, mas especificamente em agosto, observou-se comportamento não-periódico para os dois anos analisados. Quanto ao período inundado observou-se que maio 2008 e 2009 apresentaram oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes.

Ainda sobre as análises que não saturaram, observa-se que elas não são estocásticas, mas contem alguma componente caótica. Isto pode ser observado pela inclinação tendendo a saturação em  $d$  versus  $n$ , e uma pequena variação enquanto  $n$  aumenta.

## DIMENSÃO MÍNIMA (GRAUS DE LIBERDADE) DO ESPAÇO DE FASE [“n”]

Neste capítulo é apresentada a Tabela 4, na qual contém o número mínimo de graus de liberdade no espaço de fase necessário para se compreender e se explicar a variável estudada. Quando  $d$  (dimensionalidade fractal do atrator) estabiliza-se em relação à  $n$  (numero de graus de liberdade no espaço de fase) formando um platô no gráfico  $d$  versus  $n$ , este ponto de saturação representa o número mínimo de outras variáveis que são necessárias para modelar o sistema estudado.

Sistemas climáticos e Ecossistemas são sistemas dinâmicos, apresentam sensibilidade às condições iniciais e aumentam sua complexidade tanto quanto maior for o número de variáveis envolvidas em sua dinâmica. Desta forma um numero grande de variáveis dificulta a modelagem e resulta em uma previsão inadequada. Assim, optou-se em exprimir os valores de saturação  $d$  considerando um intervalo com  $d \pm 0,05$  para cada ponto plotado em  $d$  versus  $n$ .

**TABELA 4.** Número Mínimo de Graus de Liberdade no Espaço de Fase das variáveis Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR), obtidos dos gráficos “joelhos” (componentes (b) das Figuras 15 a 28).

| <b>Seca 2007</b>      |           |          |           | <b>Seca 2008</b>      |           |          |           |
|-----------------------|-----------|----------|-----------|-----------------------|-----------|----------|-----------|
| <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Julho                 | 7         | 8        | 11        | Julho                 | 6         | 7        | 7         |
| Agosto                | 7         | 8        | 8         | Agosto                | 7         | 6        | 8         |
| <b>Chuva 2008</b>     |           |          |           | <b>Chuva 2009</b>     |           |          |           |
| <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Janeiro               | 7         | 11       | 10        | Janeiro               | 7         | 8        | 8         |
| Fevereiro             | 7         | 9        | 8         | Fevereiro             | 8         | 11       | 12*       |
| <b>Inundação 2008</b> |           |          |           | <b>Inundação 2009</b> |           |          |           |
| <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> | <b>Mês/Variável</b>   | <b>Rn</b> | <b>T</b> | <b>UR</b> |
| Março                 | 7         | 7        | 7         | Março                 | 8         | 11       | 10        |
| Abril                 | 8         | 8        | 12*       | Abril                 | 7         | 8        | 7         |
| Maió                  | 6         | 7        | 7         | Maió                  | 6         | 8        | 7         |

\* valores de  $d$  não saturados imersos em um espaço de fase de 12  $n$ .

Algumas curvas  $d$  versus  $n$  não saturaram totalmente, talvez isto seja devido a uma componente não-linear acoplada a série temporal, ou seja, um baixo acoplamento com outros subsistemas de modo que haja uma influência secundária dessas outras variáveis.

Quanto ao número mínimo de graus de liberdade no espaço de fase, a variável Balanço de Radiação ( $R_n$ ) foi a mais bem comportada para todas as sazonalidades.  $R_n$  para o período seco está entre um intervalo de 6 a 7 graus de liberdade; no período inundado de 6 a 8 graus de liberdade, e no período chuvoso de 7 a 8 variáveis.

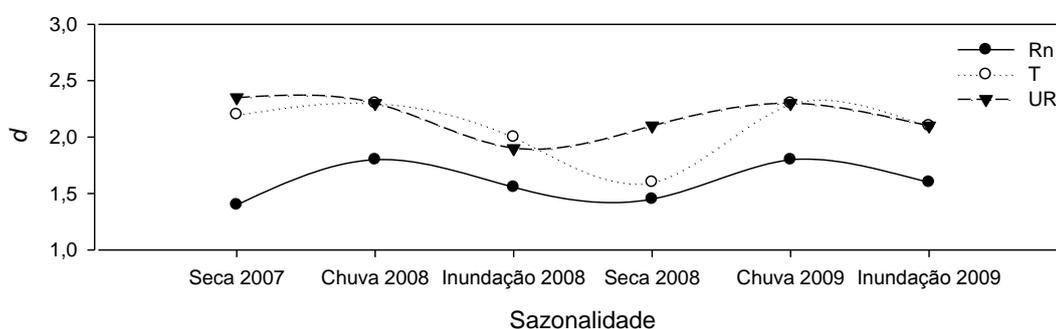
Os números mínimos de graus de liberdade para a variável Temperatura do Ar ( $T$ ) comportaram-se mais próximos do encontrado para o Balanço de Radiação ( $R_n$ ) no período seco e inundado.

A Umidade Relativa do Ar ( $UR$ ) apresentou os maiores números de graus de liberdade para o período seco. No período chuvoso oscilou entre 8 e 12\* graus de liberdade, enquanto que na inundação manteve-se entre 7 e 12 graus de liberdade.

Todos os graus de liberdade do Sistema Terra estão de algum modo interligados, logo temos fluxos de matéria, energia e momentum entres os diversos sub-sistemas que o compõem. O ecossistema Pantanal, objeto desta análise, é um subsistema do sistema global; ora se expande abarcando mais graus de liberdade ( $n$ ) e ora se contrai diminuindo o número das variáveis mais relevantes para compreensão dos estados do atrator. Lorenz afirma “que o ambiente pode ser visto como sub-sistemas de baixo acoplamento. Neste caso, os estudos tentam avaliar a dimensão do subsistema.” (LORENZ, 1991)

## SAZONALIDADE EM RELAÇÃO À DIMENSIONALIDADE FRACTAL [“d”]

As dimensionalidades das variáveis analisadas, Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) apresentaram uma variação entre os períodos secos, chuvosos e inundados. Este comportamento sistemático da dimensionalidade dos atratores pode ser observado pelas médias dos períodos plotados na figura abaixo.



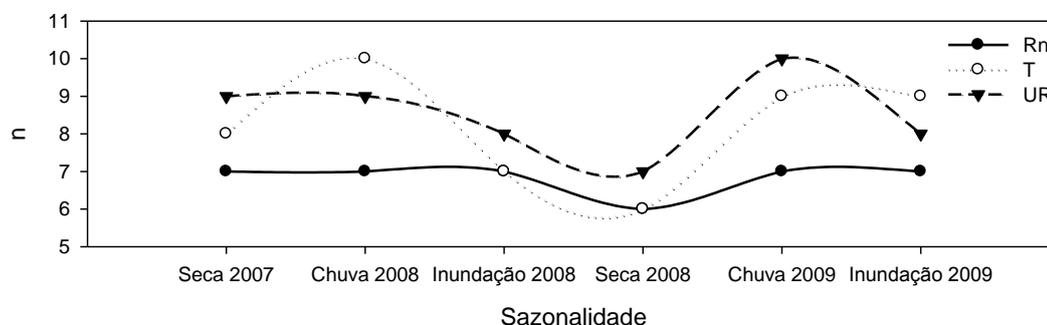
**FIGURA 30.** Tendência sazonalmente do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores.

O Saldo de Radiação (Rn) e Temperatura do Ar (T) apresentaram o mesmo comportamento, em média, quanto a variação da dimensionalidade sazonalmente, aumentando no período chuvoso e diminuindo no período seco. Para essas variáveis, o período de inundação se apresenta como transição chuva-seca.

A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou, em média, suas menores dimensionalidades no período de inundação, visto a Floresta de Cambarazal/Pantanal ser mono-dominante, estar alagada com aproximadamente um metro de lâmina d'água e contar com pouca ocorrência de chuvas. Nos períodos secos e chuvosos foram encontradas as maiores dimensionalidades, vindo em seguida os períodos inundados.

## SAZONALIDADE COM RELAÇÃO AOS GRAUS DE LIBERDADE [“n”]

As variáveis Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) apresentaram uma variação sazonal quanto ao número de graus de liberdade. Todas as séries temporais das variáveis analisadas diminuíram, em média, o número de graus de liberdade no período seco. Isto implica em uma maior possibilidade de entendimento dessas variáveis no período seco. Segue figura abaixo ilustrando as tendências.



**FIGURA 31.** Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade “n” necessários para explicar as variáveis Balanço de Radiação (Rn), Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR).

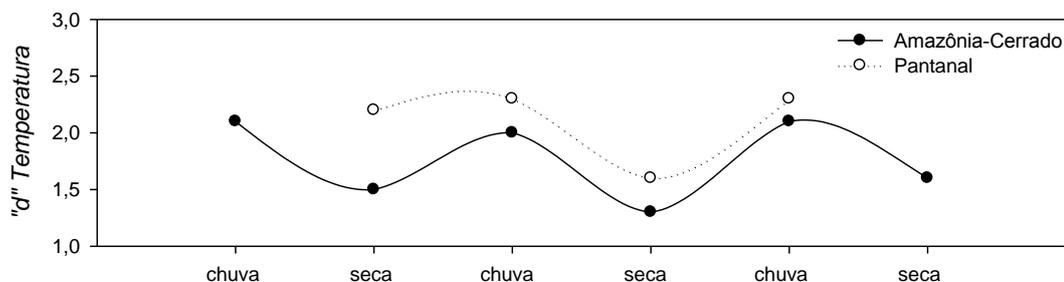
O Saldo de Radiação (Rn) apresentou uma diminuição de aproximadamente 1 (um) grau de liberdade no período seco, já as variáveis Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) diminuíram de 3 a 4 graus de liberdade. O período inundado apresentou-se como transição chuva-seca.

## PANTANAL E FLORESTA AMAZÔNICA: COMPARAÇÃO ENTRE OS ECOSISTEMAS

Capistrano (2007) analisou dados coletados entre 2001 e 2006 provenientes de uma torre micrometeorológica instalada em uma floresta de transição entre a Floresta Amazônica e o Cerrado no norte de Mato Grosso, município de Sinop, delimitando somente meses de estação chuvosa e estação seca. Embora o trabalho de Capistrano (2007) se difere quanto aos anos analisados, é possível fazer uma comparação entre os resultados sazonais, pois as estações seca e chuvosa são bem definidas.

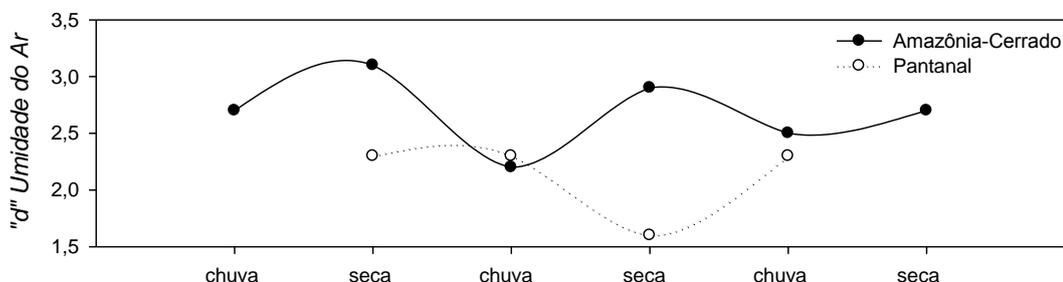
Capistrano (2007) encontrou resultados semelhantes quanto a sazonalidade para a variável Temperatura do Ar (T) apontando uma dimensionalidade do atrator maior no período chuvoso e menor no período seco. Já para a variável Umidade Relativa do Ar (UR) os resultados foram opostos aos encontrados para a análise dos dados provenientes do ecossistema Pantanal (Fig. 33). Enquanto na floresta de transição Amazônia-Cerrado as maiores dimensionalidades para Umidade Relativa do Ar (UR) foram na estação seca, no Pantanal elas foram maiores na estação chuvosa. A partir destes dados pode-se inferir que a Floresta de Cambarazal no Pantanal exerce uma forte influência na estabilidade microclimática.

Ainda comparando os dois ecossistemas quanto a aplicação do algoritmo observa-se que, para o Pantanal, a Temperatura do Ar (T) foi mais caótica e a Umidade Relativa do Ar (UR) foi mais comportada (mas mesmo assim, caótica de baixa dimensão) em todas as sazonalidades.



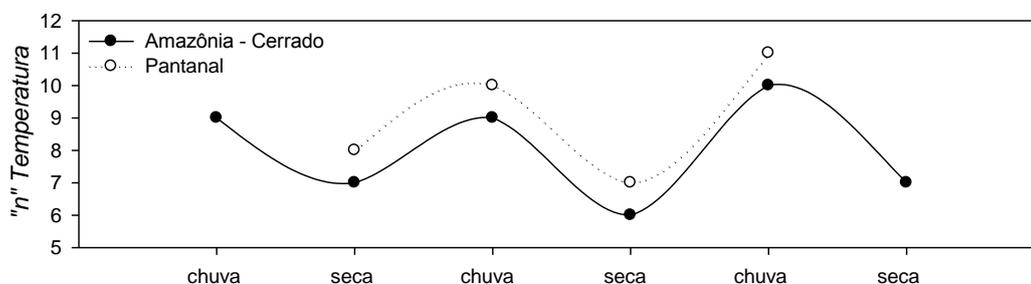
**FIGURA 32.** Tendência sazonalmente do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores “d” da Temperatura do Ar (T) para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado.

A dimensionalidade fractal  $d$  com valor menor que 2 para a umidade do Cambarazal do Pantanal, pode ter sido resultado pela ausência de frente fria e baixa velocidade do vento.

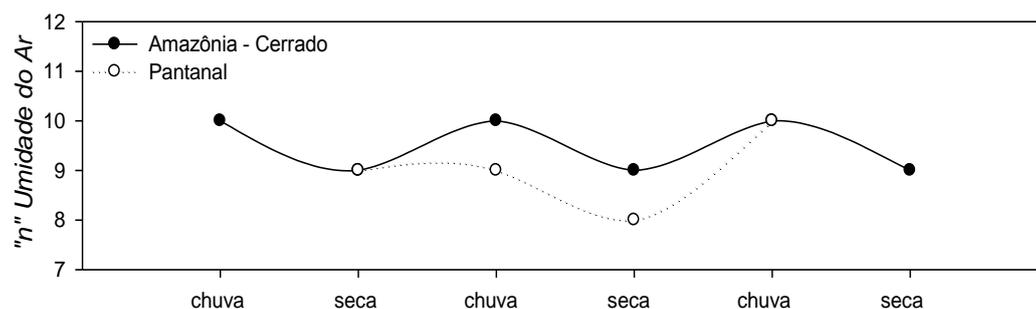


**FIGURA 33.** Tendência sazonal do comportamento da dimensionalidade fractal dos atratores da Umidade Relativa do Ar (UR) para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado.

Consoante com o parágrafo anterior, os dados quanto ao número mínimo de graus de liberdade no espaço de fase ( $n$ ) necessários para a explicação da variável foi, em média, maior para a Temperatura do Ar (T) e menor para a Umidade Relativa do Ar (UR). Novamente o valor de “ $n$ ” mínimo para o Cambarazal do Pantanal que ficou igual a 8 se refere a uma seca sem a presença de frentes frias e com médias de vento menor que 1,3km/h.



**FIGURA 34.** Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade necessários para explicar a variável Temperatura do Ar (T) para o Pantanal e para Amazônia – Cerrado.



**FIGURA 35.** Tendência sazonal quanto ao número mínimo de graus de liberdade necessários para explicar a variável Umidade Relativa do Ar (UR) para o Pantanal e para Amazônia - Cerrado.

## CONCLUSÃO

Os valores da dimensionalidade fractal ( $d$ ) dos atratores das variáveis analisadas utilizando defasagem temporal de  $\tau = 5h$ , a partir da saturação de  $d$  versus  $n$  no espaço de fase com 12 graus de liberdade foram: Balanço de Radiação (Rn) estabilizou-se em todas as análises e sazonalidades mantendo-se entre  $1 < d < 2$ . A série temporal da variável Temperatura do Ar (T) apresentou um atrator com dimensionalidade  $d > 2$  no período chuvoso, não estabilizando em fevereiro de 2009; os períodos inundados foram marcados por  $d \geq 2$  nos dois primeiros meses e  $d < 2$  no terceiro mês; no período seco de 2007 (figuras 10 e 11), a dimensionalidade foi  $d > 2$ , e no período seco de 2008 foi  $d < 2$ . A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou  $d > 2$  no período chuvoso, não se estabilizando em janeiro de 2008 e fevereiro de 2009; no período seco de 2007 apresentou  $d > 2$ , enquanto o período seco de 2008 oscilou do mês julho com  $d < 2$  para agosto com  $d > 2$  não-estabilizado; no período inundado de 2008 configurou-se oscilante nos seus três meses, sendo  $d < 2$ ,  $d > 2$  não-estabilizado e  $d < 2$ . A inundação 2009 apresentou  $d \geq 2$ .

A classificação das variáveis quanto ao comportamento: Periódico (I), Quase-Periódico (II) e Não-Periódico (III): a variável Balanço de Radiação (Rn) para o período seco apresentou oscilação periódica auto-sustentável. A variável Temperatura do Ar (T) para o período chuvoso apresentou oscilação não-periódica e imprevisibilidade intrínseca. O mesmo ocorreu com o período seco de 2007. Já o

período seco de 2008 apresentou oscilação periódica auto-sustentável. O período inundado foi marcado em 2008 por oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes e não-periódicas, e 2009 por oscilações não-periódicas tendendo a uma oscilação periódica auto-sustentável. A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou oscilações não-periódicas em todos os períodos, principalmente no período chuvoso, em que todas as classificações foram marcadamente não-periódicas. No período seco, mas especificamente em agosto, observou-se comportamento não-periódico para os dois anos analisados. Quanto ao período inundado observou-se que maio 2008 e 2009 apresentaram oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes.

Séries temporais de variáveis micrometeorológicas medidas em floresta de Cambarazal, ecossistema Pantanal Matogrossense podem apresentar um atrator estranho sendo que das variáveis analisadas, a Umidade Relativa do Ar (UR) se exhibe como a mais complexa de ser modelada.

Quanto ao Número Mínimo de Graus de Liberdade ( $n$ ) no Espaço de Fase das variáveis (ou seja, o número mínimo de outras variáveis necessárias para explicar a variável analisada) o Balanço de Radiação ( $R_n$ ) foi a mais bem comportada para todas as sazonalidades resultando para o período seco um intervalo de 6 a 7 graus de liberdade; para o período inundado de 6 a 8 graus de liberdade, e no período chuvoso de 7 a 8 variáveis. Os números mínimos de graus de liberdade para a variável Temperatura do Ar ( $T$ ) comportaram-se mais próximos do encontrado para o Balanço de Radiação ( $R_n$ ) no período seco e inundado. A Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou os maiores números de graus de liberdade para o período seco. No período chuvoso oscilou entre 8 e 12\* graus de liberdade, enquanto que na inundação manteve-se entre 7 e 12 graus de liberdade.

Dos resultados quanto variação sazonal da dimensionalidade fractal, o Saldo de Radiação ( $R_n$ ) e Temperatura do Ar ( $T$ ) apresentaram o mesmo comportamento, em média, aumentando no período chuvoso e diminuindo no período seco. Para essas variáveis, o período de inundação se apresenta como transição chuva-seca. A variável Umidade Relativa do Ar (UR) apresentou, em média, suas menores

dimensionalidades no período de inundação. Nos períodos secos e chuvosos foram encontradas as maiores dimensionalidades, vindo em seguida os períodos inundados.

As relações sazonais quanto ao Número Mínimo de Graus de Liberdade no Espaço de Fase das variáveis: o Saldo de Radiação ( $R_n$ ) apresentou uma diminuição de aproximadamente 1 (um) grau de liberdade do período chuvoso para o período seco, já as variáveis Temperatura do Ar (T) e Umidade Relativa do Ar (UR) diminuíram de 3 a 4 graus de liberdade na transição chuva-seca. O período inundado apresentou-se como transição chuva-seca.

O particular balanço de radiação na Floresta de Cambarazal no Pantanal Norte Matogrossense e Floresta de Transição Amazônia-Cerrado são importantes na manutenção dos fluxos de calor, na regulação da temperatura e da umidade regional. Esses biomas estão sobre a influência do arco do desmatamento, de modo que se acoplam espacialmente as pastagens e monoculturas.

Na comparação dos ecossistemas Floresta de Cambarazal no Pantanal Norte Matogrossense e Floresta de Transição Amazônia-Cerrado, o atrator da variável Temperatura do Ar (T) apresentou dimensionalidade ligeiramente maior para os dados do Cambarazal, seguindo a mesma tendência sazonal, maior dimensionalidade no período chuvoso e menor no período seco.

O atrator da Umidade Relativa do Ar (UR) da Floresta de Cambarazal no Pantanal obteve dimensionalidade menor do que a Floresta de Transição Amazônia-Cerrado. Os resultados foram opostos sazonalmente, enquanto na floresta de transição Amazônia-Cerrado as maiores dimensionalidades para Umidade Relativa do Ar (UR) foram na estação seca, no Pantanal elas foram maiores na estação chuvosa, e ainda o valor máximo da dimensionalidade para Cambarazal foi o valor mínimo da dimensionalidade para Amazônia-Cerrado. Esse resultado sugere que a Floresta de Cambarazal no Pantanal age como regulador da periodicidade da Umidade Relativa do Ar (UR), o que pode ser melhor observado no período seco em que as chuvas menos frequentes permitem a aferição de valores de UR mais ligados a evapotranspiração. A floresta de Cambarazal no Pantanal parece atuar na manutenção de um microclima próprio, se comportando como um super organismo

que interage na interface solo planta atmosfera, sendo um exemplo claro de complexidade e auto-organização.

Os resultados da aplicação do método da reconstrução da dinâmica de sistemas complexos de dados de séries temporais (atratores reconstruídos através da defasagem de séries temporais) se apresentaram úteis quanto aos dados sobre as suas dimensionalidades fractais, caoticidade da série temporal e número mínimo necessário de outras variáveis para explicar a variável em questão; no entanto se faz necessário o uso de outras ferramentas matemáticas para uma confirmação mais segura dos resultados, a exemplo o método de análise Expoente de Lyapunov.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS

ABARBANEL, H. D. I., BROW, R.; SIDOROWICH, J. J.; TSIMRING, L. Sh. The analysis of observed chaotic data in physical systems. **Review of Modern Physics**. Vol. 65, n. 4, p.1331-1392, 1993.

ADDISON, P. S. **Fractals and chaos: an illustrated course**. London/UK: Institute of Physics Publishing Ltda., 1997. 256p.

ARIEIRA, J., NUNES DA CUNHA, C. Fitossociologia de uma floresta inundável monodominante de *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae), no Pantanal Norte, MT, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v.20, p.569-580, 2006.

BAKER, G. L., GOLLUB, J. P. **Chaotic dynamics: an introduction**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 1996. 256p.

BELLAVER, V. **Difusividade térmica do solo em área monodominante de cambará no norte do Pantanal Matogrossense**. Cuiabá, 2010. 54p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

BÉNARD, H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. – méthodes optiques d’observation et d’enregistrement. **Journal de Physique Théorique et Appliquée**. France, Vol. 10, n. 1, p. 254-266, 1901.

BERGÉ, P., POMEAU, Y., DUBOIS-GANCE, M. **Dos ritmos ao caos**. 1. ed. São Paulo, UNESP, 1996. 301p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. UNICAMP/CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Posigraf, 2008. 83p. Disponível em: [www.embrapa.br/publicacoes](http://www.embrapa.br/publicacoes). Acesso em: 16 jun. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. AEB – Agência Espacial Brasileira. **Mudanças ambientais globais: o efeito estufa**. [NOBRE, C. A., SAMPAIO, G., CARDOSO, M., SALAZAR, L., HITORA, M., LAPOLA, D., PESQUERO, J.] CD-ROM. Disponível em <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 05 mai. 2009.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. **Manual de desastres - volume I - desastres naturais**. 1. ed. Brasília, 2003. 174p. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br>. Acesso em: 25 ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de biomas do Brasil: primeira aproximação**. Brasília: 2004. 1p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 17 jun. 2010.

CAPISTRANO, V. B. **análise de séries temporais de variáveis microclimatológicas medidas em Sinop-MT utilizando a teoria da complexidade**. Cuiabá, 2007. 47p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

CAPRA, F. **A teia da vida**. 10. ed. São Paulo: Cultrix, 2006. 256p.

CAPRA, F. **O ponto de mutação**. 22. ed. São Paulo: Cultrix, 2001. 447p.

ECKMANN, J. P., RUELLE, D. Ergodic theory of chaos and strange attractors. **Review of Modern Physics**, USA, vol. 57, n. 3, p. 617-656, 1985.

FALCONER, K. **Fractal geometry: mathematical foundations e applications**. 2. ed. West Sussex, UK: Jonh Wiley & Sons Ltd, 2003. 337p.

GALLON, M. M. P. **Um estudo sobre a dinâmica de sistemas complexos a partir de séries temporais de dados microclimáticos para a floresta de transição no noroeste de Mato Grosso**. Cuiabá, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

GLEICK, J. **Caos: a criação de uma nova ciência**. 17. ed. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 1989. 310p.

GRASSBERGER, P.; PROCACCIA, I. Characterization of strange attractors. **The American Physical Society**. USA, Vol.50, n. 5, p. 346-349, 1983.

HASENACK, H.; CORDEIRO, J. L. P.; HOFMANN, G. S. **O Clima da RPPN SESC-Pantanal**. Porto Alegre, UFRGS, 27 p., 2003.

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** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996 p. Disponível em [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg1\\_report\\_the\\_physical\\_science\\_basis.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm). Acesso em: 10 jun. 2010.

JORGE NETO, M. **Física ambiental e teoria da complexidade: possibilidades de ensino na educação básica**. Cuiabá - MT, 2009. 99f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

KIM, H. S., LEE, K. H., KYOUNG, M. S., SIVAKUMAR, B., LEE, E. T. Measuring nonlinear dependence in hydrologic time series. **Stoch Environ Res Risk Assess**, vol. 23, p.907-916, 2008.

LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. **Journal of Atmospheric Sciences**, vol. 20, p. 130-141, 1963.

LORENZ, E. N. Dimension of weather and climate attractors. **Letters to Nature**, vol. 353, p. 241-244, 1991.

LOVELOCK, J. **GAIA, Una ciencia para curar el planeta**. Barcelona: Integral, 1992. 192p.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York, USA: W. H. Freeman and Company, 1977. 468p.

MARESCHAL, M., MANSOUR, M.M., PUHL, A., KESTEMONT, E. Molecular dynamics versus hydrodynamics in a two-dimension Rayleigh-Bénard system. **The American Physical Society. Physical Review Letters**. USA, Vol.61, n. 22, p. 2550-2553, 1988.

MARGULIS, L. **O planeta simbiótico: uma nova perspectiva da evolução**. Rio de Janeiro; Rocco, 2001. 137p.

MATURANA, H. R., VARELA, F. J. **A árvore do conhecimento: as bases biológicas da compreensão humana**. 6. ed. São Paulo: Pala Athenas, 2007. 288p.

MAY, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. **Nature**, Vol. 261, p.459, 1976.

MOON, F. C. **Chaotic vibrations: an introduction for applied scientists and engineers**. John Wiley & Sons. USA, 2004. 309p.

NICOLIS, G., PRIGOGINE, I. **Exploring complexity: an introduction**. 5. ed. New York, USA: W. H. Freeman and Company, 1998. 312p.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 440p.

ÓSIPOV, A. I. **Caos y auto organización**. Moscou: URSS, 2003. 148p.

PALÚ, A. E. R. **Determinação do tempo de defasagem mais adequado para análise de séries temporais de variáveis microclimatológicas medidas numa floresta de transição no norte de Mato Grosso.** Cuiabá, 2008. 38p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

PECHENKIN, A. B P Belousov and his reaction. **Indian Academy of Science, Journal of Biosciences**, vol 34(3), p.365-371, 2009.

PEITGEN, H.; JORGENS, H.; SAUPE, D. **Chaos and fractals: new frontiers of science.** 2. ed. New York: Springer-Verlag, 2004. 864p.

PEREIRA, R. A., ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas.** 1. ed. São Paulo: UNESP, 1996. 199p.

RUELLE, D., TAKENS, F. On the nature of turbulence. **Comm. Math. Phys.** v.20, p.167–192, 1971.

SIVAKUMAR, B. Chaos theory in geophysics: past, present and future. **Chaos, Solitons & Fractals**, Elsevier, vol. 19, n. 2, p. 441-462, 2004.

STEWART, I. **Será que Deus joga dados? a nova matemática do caos.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1991. 336p.

TSONIS, A. A., ELSNER, J. B., GEORGAKAKOS, K. P. Estimating the dimension of weather and climate attractors: important issues about the procedure and interpretation. **American Meteorological Society. Journal of the Atmospheric Sciences.** USA, vol. 50, n. 15, p. 2549–2555, 1993.

TURING, A. M. The chemical basis of morphogenesis. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, Biological Sciences.** Vol. 237, No. 641, p.37-72, 1952.

ÚLTIMA HORA, A. **The 11th hour.** EUA, 2007. 91 min. Warner Independent Pictures, direção: CONNERS, N., PETERSEN, L. C., roteiro: CONNERS, N.,

DICAPRIO, L., PETERSEN, L. C., produção: DICAPRIO, L., PETERSEN, L. C., CASTLEBERRY, C., e GERBER, B.

VIDAL, L. A. **Estudo da dinâmica de variáveis microclimatológicas da estação meteorológica de superfície do destacamento de controle do espaço aéreo de Cuiabá.** Cuiabá, 2009. 79f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

WALDROP, M. M. **Complexity, the emerging science at the edge of order and chaos.** Touchstone, New York, 1992. 380p.

ZHABOTINSKY, A. M., ZAIKIN, A. N. Autowave processes in a distributed chemical system. **Journal of Theoretical Biology**, Vol. 40, Issue 1, p.45-61, 1973.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

ABARBANEL, H. D. I.; BROW, R.; SIDOROWICH, J. J.; TSIMRING, L. Sh. The analysis of observed chaotic data in physical systems. **Review of Modern Physics**, Vol. 65, n. 4, p.1331-1392, 1993.

ASSIS, T. A.; MIRANDA, J. G. V.; MOTA, F. B.; ANDRADE, R. F. S.; CASTILHO, C. M. C. Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Vol. 30, n. 2, 2304, p. 01-10, 2008.

BERNDTSSON, R.; UVO, C.; MATSUMOTO, M.; JINNO, K.; KAWAMURAN, A.; XU, S.; OLSSON J. Solar-climatic relationship and implications for hydrology. **Hydrology Research: Nordic Hydrology**, Vol. 32 (2), p. 65-84, 2001.

BIUDES, M.S. **Balço de energia em área de vegetação monodominante de camará e pastagem no norte do pantanal**. 2008. 142p. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade Federal de Mato Grosso.

BRASIL. SEMA/MT - Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Mato Grosso; ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade; WWF-Brasil. **Efetividade de gestão das unidades de conservação no Estado de Mato Grosso**. Brasília: WWF-Brasil, 2009. 70 p.

CAMPANHARO, A.S.L.O.; RAMOS, F.M.; MACAU, E.E.N.; ROSA, R.R.; BOLZAN, M.J.A.; SÁ, L.D.A. Searching chaos and coherent structures in the atmospheric turbulence above the Amazon forest. **Phil. Trans. R. Soc. A**, Vol. 366, p. 579-589, 2007.

CAO, L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. **Elsevier: Physica D**. Vol. 110, p. 43-50, 1997.

CHANG, P.; JI, L.; WANG, B.; TIM, L. Interactions between the seasonal cycle and El Niño – southern oscillation in an intermediate coupled ocean – atmosphere model. **American Meteorological Society**. Vol. 52, n. 13, p. 2352-2372, 1995.

CHIAN, A. C. L.; MIRANDA, R. A.; KOGA, D.; BOLZAN, M. J. A.; RAMOS, F. M.; REMPEL, E. L. Analysis of phase coherence in fully developed atmospheric turbulence: Amazon forest canopy. **European Geosciences Union and the American Geophysical Union: Nonlinear Processes Geophysics**, Vol. 15, p. 567–573, 2008.

ÉRDI, P. **Complexity explained**. 9. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 316p.

KEPPENNE, C. L.; NICOLIS, C. global properties and local structure of the weather attractor over Western Europe. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Vol. 46, n. 15, p. 2356-2370, 1989.

KIM, H. S.; LEE, K. H.; KYOUNG, M. S.; SIVAKUMAR, B.; LEE, E. T. Measuring nonlinear dependence in hydrologic time series. **Springer-Verlag: Stoch Environ Res Risk Assess**, Vol. 23, p. 907–916, 2008.

LEWIN, R. **Complexity: life at the edge of chaos**. 10. ed. New York: Collier Books: Macmillan Publishing Company, 1992. 237p.

LORENZ, E. **the essence of chaos**. USA/Seattle: University of Washington Press, 1993. 227p.

LOVELOCK, J. E.; MARGULIS, L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the gaia hypothesis. **Tellus**, vol. 26, p. 1-2, 1974.

PACKARD, N. H.; CRUTCHFIELD, J. D.; FARMER, J. D.; SHAW, R. S. Geometry from a time series. **Physical Review Letters**. Vol. 45, n. 9, p. 712-716, 1980.

PASTERNAK, G. B. Does the river run wild? Assessing chaos in hydrological systems. **Elsevier: Advances in Water Resources**. Vol. 23, p. 253-260, 1999.

PEREIRA, R. P.; NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpiração)**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

ROSSLER, O. E. An equation for continuous chaos. **Physics Letters**, Vol. 57A, n. 5, p. 397-398, 1976.

RUELLE, D. **Change and chaos**. 10. ed. United States of American: Princeton University Press. 1991. 195p.

RUELLE, D. **Chaotic evolution and strange attractors: the statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2003. 96p.

SIVAKUMAR, B. Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol. 5(4), p. 645-651, 2001.

SIVAKUMAR, B.; HARTER, T.; ZHANG, H. Solute transport in a heterogeneous aquifer: a search for nonlinear deterministic dynamics. **European Geosciences Union: Nonlinear Processes in Geophysics**, Vol. 12, p. 211-218, 2005.

SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Sistemas complexos: novas formas de ver a botânica (artigo de revisão). **Revista Brasil. Bot.**, Vol. 27, n. 3, p. 407-419, 2004.

STEFANSKI, K. Modelling chaos and hyperchaos with 3-D maps. **Elsevier Science: Chaos, Solitons & Fractals**, Vol. 9, n. 1/2, p. 83-93, 1998.

TSONIS, A. A.; ELSNER, J. B. Comments on “The southern oscillation as an example of a simple, ordered subsystem of a complex chaotic system” (Notes and Correspondence). **American Meteorological Society**, 1998.

WANG, Q. Correlation dimension estimates of global and local temperature data. **American Meteorological Society: Journal of Applied Meteorology**. Vol. 34, p. 2556-2564, 1995.

WATSON, A. J.; LOVELOCK, J. E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. **Tellus**, Vol. 35b, p. 284-289, 1983.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2ª edição. Brasília: INMET, 2001. 532p.

REICHART, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri/SP: Editora Manole Ltda., 2004. 478p.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001. 291p.