

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS
MICROCLIMATOLÓGICAS MEDIDAS EM SINOP-MT UTILIZANDO A
TEORIA DA COMPLEXIDADE**

VINÍCIUS BUSCIOLI CAPISTRANO

ORIENTADOR: PROF. DR. SERGIO ROBERTO DE PAULO

CUIABÁ-MT, JANEIRO DE 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E MEIO AMBIENTE

**ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE VARIÁVEIS
MICROCLIMATOLÓGICAS MEDIDAS EM SINOP-MT UTILIZANDO A
TEORIA DA COMPLEXIDADE**

VINÍCIUS BUSCIOLI CAPISTRANO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Física e Meio Ambiente.

ORIENTADOR: PROF. DR. SERGIO ROBERTO DE PAULO

CUIABÁ-MT, JANEIRO DE 2007.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Elídia e Antônio, a quem eu sou muito grato, pelos exemplos, ensinamentos e por sempre estarem presentes incentivando a minha formação e as minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente agradeço a todos os meus professores, sejam eles do meu ensino infantil, fundamental, médio ou superior, pela paciência e motivação, pois só somos capazes de vitórias quando nossos sonhos são alimentados. Obrigado professores.
- Ao professor Sérgio, mentor deste trabalho, amigo que tenho grande admiração.
- Agradeço aos meus irmãos Mailton, Nádia e Letícia; também á minha namorada Célia.
- Ao meu primeiro orientador de iniciação científica prof. Dr. Nicolau Priante Filho, que ensinou-me a ter uma visão mais prática.
- Agradeço ao também orientador na iniciação científica e coordenador programa do mestrado prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná), que como poucos, mostra sempre disposição.
- A Mauro Massao (In Memoriam), colega que deixou grandes contribuições na área de estudo; contribuições que sem as quais o presente trabalho não poderia ser realizado.
- Aos todos os colegas e professores do programa de pós-graduação em Física e Meio Ambiente.
- Ao prof. Dr. Campelo pelo compartilhamento da sua grande sabedoria.
- Ao prof. Dr. Francisco Lobo (Chico), que exerce com louvor a profissão de professor, pelas muitas horas de ajuda e apoio.
- A Márcia Gallon, colega que auxiliou-me no estudo da complexidade.
- Aos professores doutores: Carlos Rinaldi, Luciana Sanches, Max Roos e Sandro Costa.
- Aos amigos Paulino, Osvaldo, Marcelo, Carlos Dias, Thiago, Eric, Edmilson, Alison, Marcelo Testa, e Euzébio.
- Aos bolsistas de iniciação científica: João Junior, Nara, Camila, Ândrea e Durval.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1 RADIAÇÃO SOLAR E BALANÇO DE ENERGIA	3
2.1.1 Radiação.....	3
2.1.2 Terra-Atmosfera e o Efeito Estufa.....	7
2.1.3 Processo fotossintético.....	9
2.1.4 Balanço de Energia	11
2.2 MICROMETEOROLOGIA - MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE VÓRTICES TURBULENTOS (EDDY COVARIANCE)	11
2.3 TEORIA DA COMPLEXIDADE.....	13
2.3.1 Espaço de fase.....	14
2.4 RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE FASE A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS	14
2.4.1 Dimensionalidade do atrator	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 ÁREA DE ESTUDO	21
3.2 COLETA DE DADOS	22
3.3 SELEÇÃO DE DADOS E PREENCHIMENTO DE FALHAS	23
3.4 OBTENÇÃO DA DIMENSIONALIDADE DO ATRATOR E DA DIMENSIONALIDADE MÍNIMA	24
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
4.1 RESULTADOS DA DIMENSÃO EMBUTIDA.....	28
4.2 DIMENSIONALIDADE DOS ATRADORES.....	37
4.3 DIMENSIONALIDADE MÍNIMA (GRAUS DE LIBERDADE).....	39
4.4 O ATRATOR DA TEMPERATURA	40
4.5 SAZONALIDADE COM RELAÇÃO À DIMENSIONALIDADE DOS ATRADORES	42
4.6 SAZONALIDADE COM RELAÇÃO AOS GRAUS DE LIBERDADE	44

5	CONCLUSÕES	46
6	BIBLIOGRAFIA	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição espectral da radiação do corpo negro para diferentes temperaturas.....	5
Figura 2 – Absorvidade dos principais componentes da atmosfera.	7
Figura 3 – Balanço de energia.	9
Figura 4 – Atrator caótico obtido por integração numérica do modelo de Rössler, com $a = 0,32$, $b = 0,3$ e $c = 4,5$	16
Figura 5 – Solução da componente $x(t)$ das equações de Otto Rössler.	17
Figura 6 – Reconstrução do atrator de Rössler por meio de defasagem de série temporal da componente $x(t)$	18
Figura 7 - Local de Estudo.	22
Figura 8 - Comportamento da correlação entre a serie temporal do mês fevereiro de 2001 para o fluxo de CO ₂ e a mesma série defasada em τ	25
Figura 9 - Comportamento da correlação entre a serie temporal do período de julho e julho de 2002 para o fluxo de CO ₂ e a mesma série defasada em τ	25
Figura 10 – Gráfico “joelhos”, que representa as linhas de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ para diferentes dimensão do espaço de fase.....	26
Figura 11 - Tendência da dimensão embutida (d) com o aumento da dimensão do espaço de fase (n), enfatizando a sua saturação, onde se dá a dimensionalidade do atrator e a dimensionalidade mínima.....	27
Figura 12 – Comportamento da dimensão embutida, d , para concentração de CO ₂ , sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	29
Figura 13 Comportamento da dimensão embutida, d , para concentração de H ₂ O, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	30
Figura 14 – Comportamento da dimensão embutida, d , para o fluxo de CO ₂ , sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	31
Figura 15 – Comportamento da dimensão embutida, d , para o fluxo de calor latente, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	32
Figura 16 – comportamento da dimensão embutida para o fluxo de calor sensível, sendo: (a)	

fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	33
Figura 17 – Comportamento da dimensão embutida, d , para a temperatura, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	34
Figura 18 – Comportamento da dimensão embutida, d , para a velocidade do vento, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.....	35
Figura 19 – Comportamento da dimensão embutida, d , para velocidade de fricção, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) julho de 2005. (c) janeiro e fevereiro de 2006. (d) agosto de 2006.....	36
Figura 20 – Comportamento da dimensionalidade dos atratores de fluxo de CO ₂ a defasagem temporal (τ) para os meses de fevereiro de 2001, junho e julho de 2002, fevereiro de 2003, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, e agosto de 2006.....	39
Figura 21 – Dia médio do período de junho e julho de 2002 para temperatura.....	40
Figura 22 - Atrator da temperatura.....	41
Figura 23 – Comportamento da correlação entre a serie temporal do período de julho e julho de 2002 para temperatura e a mesma série defasada em τ	42
Figura 24 – Tendência sazonal da dimensionalidade dos atratores da concentração de CO ₂ , concentração de H ₂ O e temperatura.....	43
Figura 25 – Tendência sazonal da dimensionalidade mínima para a concentração H ₂ O e temperatura.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de alguns componentes atmosférico.	8
Tabela 2 – Valores da dimensionalidade dos atratores, obtidas das Figuras 12 até 19, da concentração de CO ₂ , da concentração de H ₂ O, do fluxo de CO ₂ , do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível, da temperatura, da velocidade do vento e da velocidade de fricção. .	37
Tabela 3 – classificação das variáveis em: periódicas, quase-periódicas e caóticas.	38
Tabela 4 – Valores da dimensionalidade mínima, obtidas das Figuras 12 até 19, da concentração de CO ₂ , da concentração de H ₂ O, do fluxo de CO ₂ , do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível, da temperatura, da velocidade do vento e da velocidade de fricção. .	39

RESUMO

CAPISTRANO, V. B. **Análise de Séries Temporais de Variáveis Microclimatológicas Medidas em Sinop-MT Utilizando a Teoria da Complexidade.** Cuiabá, 2007. 47p. Dissertação (Mestrado) – Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

O presente estudo foi realizado em uma floresta de transição entre cerrado e floresta tropical úmida no norte de Mato Grosso, e consiste em reconstruir a dinâmica da floresta por séries temporais levando em conta o caráter não linear do ambiente, pois a floresta é um sistema complexo. Os dados analisados foram coletados no período de 2001 a 2006, porém sendo analisadas somente séries de dados referentes a meses de estação chuvosa ou seca. Ao total foram três meses do período de estação seca e três meses de estação chuvosa. As variáveis em questão são o fluxo de calor latente e sensível, fluxo de CO₂, temperatura, concentração de CO₂ e de H₂O, velocidade do vento e velocidade de fricção. O objetivo é a caracterização do atrator das séries temporais, determinando qual a sua dimensionalidade e a dimensionalidade mínima do espaço de fase em que este atrator está descrito por completo, verificando a existência de uma diferenciação sazonal nos resultados. Muitas variáveis apresentaram a dimensionalidade dos seus atratores em torno de 2. A concentração de H₂O e a velocidade do vento apresentaram a dimensionalidade dos seus atratores maior que 2, implicando em uma maior imprevisibilidade dessas variáveis. As únicas variáveis que apresentaram uma diferença sistemática, com relação dimensionalidade, entre estação seca e chuvosa, foram a temperatura, a concentração de CO₂ e de H₂O. A temperatura e a concentração de H₂O foram as únicas variáveis que apresentam um padrão de distinção entre estação seca e chuvosa em termos de graus de liberdade.

Palavras-chaves: Sistemas Complexos, Séries Temporais, Atratores.

ABSTRACT

CAPISTRANO, V. B. **Time Series Analyze of Microclimate Variables in Sinop-MT Using the Complexity Theory.** Cuiabá, 2007. 47p. Dissertação (Mestrado) – Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

This work was performed by using data collected in a transitional forest between savannah and the tropical forest at the north of Mato Grosso, Brazil. The objective was to reconstruct the forest dynamics by analyzing time series data taking into account the non-linear behavior of the environment, since the forest is a complex system. The data were collected between 2001 and 2006, considering only the months of the wet and dry season. The variables were: latent and sensible heat fluxes, CO₂ flux, temperature, CO₂ and H₂O concentration, wind speed and frictional velocity. The objective was the characterization of the time series attractor and the estimation of the minimum dimensionality of the phase space where the attractor is embedded, verifying a possible seasonal dependence. For many variables, the attractor dimensionality was approximately equal to 2. For water concentration and wind speed, it was higher than 2, what corresponds to a higher uncertainty. The most significant seasonal difference for the attractor dimensionality was found between the concentrations of H₂O and CO₂. For the phase space dimensionality, the most important difference was found between the temperature and H₂O concentration.

Keywords: Complex Systems, Time Series, Attractors.

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia tem importância mundial devido as suas áreas com um índice de biodiversidade elevado e a sua possível capacidade de regular o clima global. Porém estudos realizados até hoje verificam grandes dificuldades de saber o nível da influencia global e regional da floresta amazônica, bem como acerca dos impactos do desmatamento, sobre tudo em regiões de floresta de transição entre cerrado e floresta amazônica, durante os recentes projetos de colonização governamental e programa de reforma agrária. Pouco se sabe sobre os efeitos de conversão de solo nas trocas de massas e de energia na mata de transição.

Mediante a estas dificuldades é primordial que se tenha em vista novas técnicas de análises que levem em conta o padrão natural das variáveis ambientais.

Ambientes florestais são sistemas complexos, e é essencial o tratar como tal. Suas muitas variáveis se influenciam mutuamente, por conseguinte são não-lineares, levando muitas vezes à incertezas e imprevisibilidades intrínsecas. Sistemas complexos se caracterizam também por serem sistemas dissipativos, abertos e distantes do equilíbrio; por apresentarem super-organismo multi-nivelado, auto-organização, retroalimentações, eventos dados por bifurcações e diminuição da entropia. E, é fundamental reconhecer que a natureza não se comporta deterministicamente. Assim, a Teoria da Complexidade é uma ferramenta adequada para entender a floresta.

O grupo de pesquisa em Física e Meio Ambiente do departamento de Física da UFMT é pioneiro no Brasil em estudo do ambiente utilizando torres microclimatológicas. Desde 1999, tal grupo faz pesquisas com a coleta de dados na floresta de transição ao norte de Mato Grosso.

Como já dito, a complexidade relacionada às muitas interconexões das variáveis

ambientais na Amazônia, decorrente de um cenário não linear, leva dificuldades para afirmações sobre a influência global e até mesmo regional da floresta amazônica no clima.

Para uma melhor formulação e entendimento da previsibilidade das variáveis ambientais, como fluxo de energia e carbono, faz-se necessário um estudo sobre a natureza de certas variáveis em certos períodos, verificando assim, as dificuldades em prevê-las e um possível efeito da sazonalidade nestas dificuldades. Uma forma de conduzir este estudo é a reconstrução da dinâmica de sistemas complexos por meio de séries temporais, tendo como base a Teoria da Complexidade. Assim, tal estudo se torna imprescindível para qualquer modelagem.

O presente trabalho tem como objetivo a identificação do atrator das séries temporais, analisando qual a dimensionalidade (d) deste atrator e a dimensionalidade mínima do espaço de fase (n) em que este atrator está descrito por completo; bem como verificar se há um comportamento sazonal destas duas grandezas para as variáveis estudadas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RADIAÇÃO SOLAR E BALANÇO DE ENERGIA

2.1.1 Radiação

Na década de 1860, ocorreu um dos momentos mais dramáticos no desenvolvimento da física, quando J. C. Maxwell uniu as leis da eletricidade e do magnetismo vindo felizmente a revelar leis do comportamento da luz. Quando terminou sua teoria, ele dissera: “havendo eletricidade e magnetismo, terá luz” (Feynman, 1962). O campo elétrico e o campo magnético sempre estão concomitantemente em atividade, tratá-los como partes individuais é um exemplo de que o pensamento cartesiano não é o mais adequado para descrição da natureza.

A radiação eletromagnética é a oscilação conjunta do campo elétrico e do campo magnético, ortogonais entre si e transversais à propagação da luz. Uma consideração simplificada é, em um espaço cartesiano, assumir que a onda eletromagnética propaga-se no eixo x devido à oscilação em y do campo elétrico e em z do campo magnético.

O comprimento de onda (λ) e a frequência (ν) da onda eletromagnética formam uma constante ao serem multiplicadas, esta constante é a velocidade da luz no vácuo ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Então, com o aumento da frequência diminui o comprimento de onda, como na equação 1, e deste modo é possível avaliar a radiação eletromagnética por estas duas grandezas.

$$\lambda \nu = c \tag{1}$$

Também na teoria quântica sobre o efeito fotoelétrico (a luz tem caráter dual, sendo onda e partícula, o efeito fotoelétrico leva em conta as propriedades corpusculares da

radiação), Einstein supôs que a energia E do fóton, está relacionada com sua frequência ν pela equação:

$$E = h\nu \quad (2)$$

Onde h é a constante de Planck, e igual a $6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s. Assim, quanto maior a frequência, maior será a energia do fóton.

O espectro eletromagnético é o conjunto seqüenciado (em comprimento de onda ou frequência) de radiações eletromagnéticas. O espectro eletromagnético é dividido em bandas, sendo as principais em ordem de aumento da frequência: as ondas de radio; as microondas; as ondas de infravermelho (que é dividido em distante e próximo); radiação visível (que corresponde à luz); as ondas ultravioletas; as ondas de raio-X; e as ondas de raio gama.

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada radiação térmica. Todo corpo emite esse tipo de radiação para o meio que o cerca, e dele a absorve. Se um corpo está inicialmente mais quente do que o meio, ele irá se esfriar, porque a sua taxa de emissão de energia excede à taxa de absorção, isto levando só em conta o transporte de calor por radiação.

A matéria em um estado condensado (isto é, sólido ou líquido) emite um espectro contínuo de radiação. Os detalhes do espectro são praticamente independentes do material particular do qual o corpo é composto, mas dependem bastante da temperatura. A temperaturas usuais, a maioria dos corpos é visível para nós não pela luz que emitem, mas pela luz que refletem. A temperaturas muito altas, no entanto, os corpos têm luminosidade própria. Mas mesmo a temperatura da ordem de milhares de Kelvin, bem mais de 90% da radiação térmica emitida é invisível para nós, estando na região do infravermelho do espectro eletromagnético (Eisberg, 1986).

A forma detalhada do espectro da radiação térmica emitida por um corpo quente depende de alguma forma da composição desse corpo. No entanto, a experiência nos mostra que há um tipo de corpo quente que emite espectro térmico de caráter universal. Esses corpos são chamados de corpos negros, isto é, corpos cuja superfície absorve toda a radiação térmica incidente sobre eles. Consequentemente, por uma questão de conservação de energia, o corpo negro é aquele que reemite toda a radiação que incide nele.

A distribuição espectral da radiação de corpos negros é especificada pela quantidade $R_T(\nu)$, chamada radiância espectral, onde ν é a frequência, que é definida de forma que $R_T(\nu)d\nu$ seja igual a energia emitida por unidade de tempo em radiação de frequência

compreendida no intervalo de ν a $\nu + d\nu$ por unidade de área de uma superfície a temperatura absoluta T .

A integral da radiação espectral $R_T(\nu)$ sobre todas as frequências ν é a energia total emitida por unidade de tempo por unidade de área por um corpo negro a temperatura T . E recebe o nome de radiância (R_T). Isto é:

$$R_T = \int_0^{\infty} R_T(\nu) d\nu \quad (3)$$

Como visto na Figura 1, R_T cresce com o aumento da temperatura. De fato, esse resultado é chamado lei de Stefan (ou Stefan-Boltzmann), e foi enunciado pela primeira vez em 1879 sob a forma de uma equação empírica.

$$R_T = \sigma T^4 \quad (4)$$

Em que, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, e é igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Sendo a temperatura T em Kelvin.

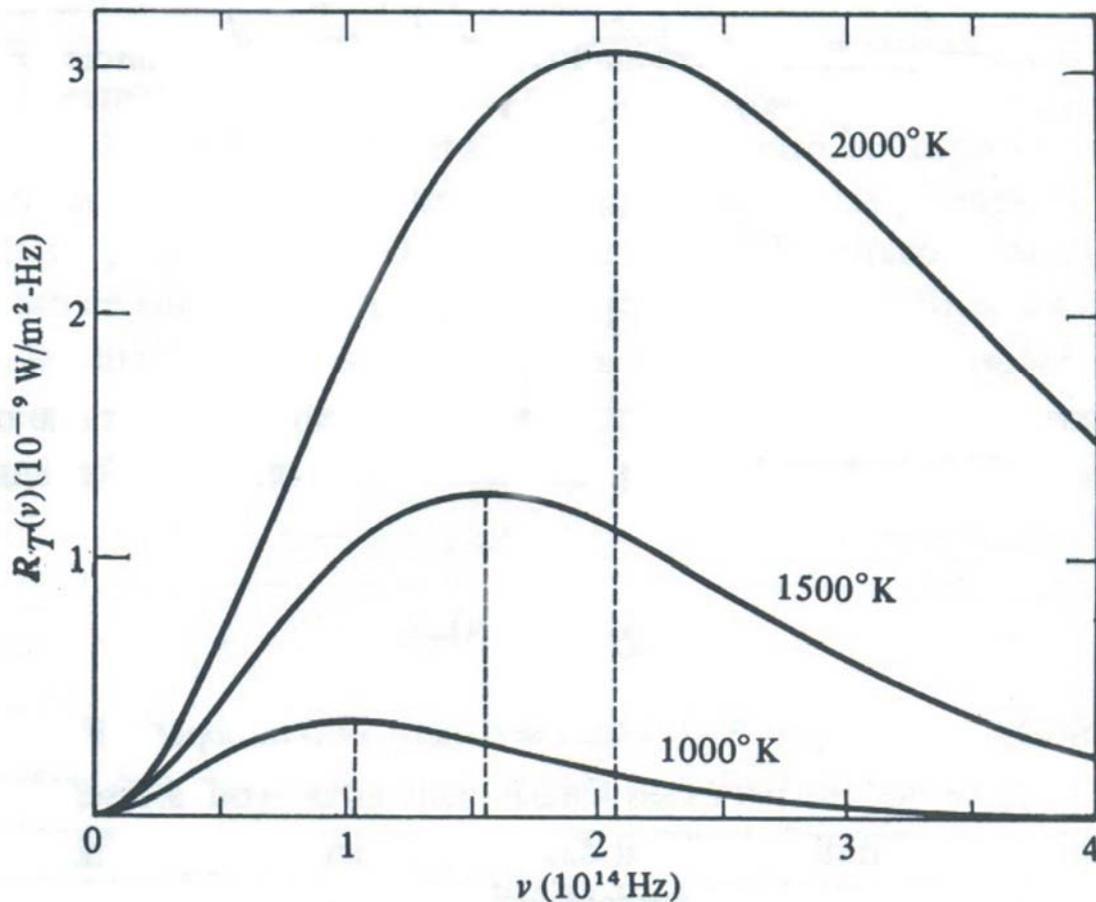


Figura 1 – Distribuição espectral da radiação do corpo negro para diferentes temperaturas.

Fonte: Eisberg, 1986.

Também na Figura 1 observa-se que o espectro desloca para maiores frequências com o aumento da temperatura. Este resultado é conhecido como o deslocamento de Wien. Ou seja, a ν para qual $R_T(\nu)$ tem seu valor máximo para uma dada temperatura se desloca para frequências mais altas quando T cresce.

A radiação pode ser emitida ou absorvida, também pode ser refletida ou transmitida. A refletividade (ou refletância) ($\rho(\lambda)$) pode ser definida como a fração de uma radiação incidente com um comprimento de onda específico que é refletido. Igualmente a absorvidade (ou absorptância) ($\alpha(\lambda)$) e transmissividade (ou transmitância) ($\tau(\lambda)$) são as frações da radiação incidente de um específico comprimento de onda que é absorvido ou transmitido por um objeto, respectivamente. A soma $\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda)$ para qualquer comprimento de onda é igual a 1.

Para um intervalo do espectro eletromagnético, como a radiação solar, são usados os termos coeficiente de absorptância (α_s), coeficiente de refletância (ρ_s) e o coeficiente de transmitância (τ_s), que equivalem às respectivas médias de absorptância, refletância e transmitância para este intervalo. O coeficiente de refletância da radiação solar para superfícies naturais é usualmente denotado por albedo (Pereira, 2002).

O Sol é uma estrela da sequência principal, que está num estágio intermediário de sua vida. Sua energia é produzida em seu núcleo por fusão nuclear de hidrogênio. Esta radiação ao sair do Sol, se propaga por aproximadamente $1,5 \cdot 10^{11}$ m até atingir o topo de nossa atmosfera com uma densidade de energia de 1370 W/m^2 , este valor é conhecido como constante solar. O espectro solar pode ser dividido em três principais regiões: o ultravioleta com comprimento de onda de 0,3 a 0,4 μm ; a radiação visível de 0,4 (luz azul) a 0,7 μm (luz vermelha); e o infravermelho 0,7 até 3 μm (Monteith, 1973).

A potencialidade dos efeitos danosos da radiação ultravioleta é minimizada pela absorção pela camada de ozônio e pelo espalhamento (radiação difusa) na atmosfera. Estes processos reduzem a quantidade de energia desta banda de 7% fora da atmosfera para 3% ao nível do mar. Radiação ultravioleta tem implicações mutagênicas para as plantas.

A radiação visível tem papel fundamental nos processos biológicos como fotossínteses e fotomorfogêneses nas plantas, visão nos animais e fotoperiodismo tanto no reino animal e vegetal. A Figura 2 mostra que há uma “janela” para luz onde a atmosfera é relativamente transparente. A fração da energia assumida quando a angulação solar é maior que 30° é de 45%, porém pode chegar até 50% quando somado a radiação direta com a difusa (Monteith, 1973).

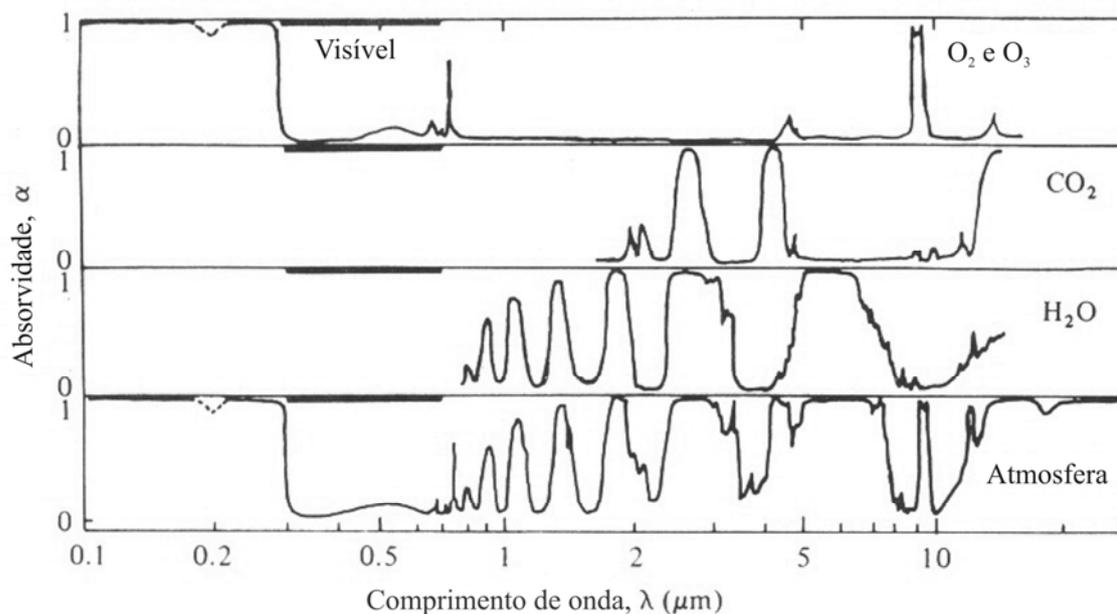


Figura 2 – Absorvidade dos principais componentes da atmosfera.

Fonte: Seinfeld (1998).

A radiação infravermelha é menos energética que a ultravioleta e que a luminosa, como sugere a equação 2. Ela é fortemente absorvida por diversos constituintes atmosféricos, notavelmente pelo vapor de água e o CO_2 (Ahrens, 2000).

Em geral, a geometria da molécula explica o fato de H_2O , CO_2 e O_3 interagirem fortemente com a radiação acima de 400 nm, mas os gases mais abundantes como O_2 e N_2 não interagem. Na molécula H_2O , por exemplo, o centro de carga negativa é deslocado para o núcleo de Oxigênio enquanto que o centro de carga positiva é deslocado para os núcleos de hidrogênio, levando a separação dos centros de carga positiva e negativa, chamados momento de dipolo elétrico. Moléculas com momento de dipolo elétrico interagem fortemente com a radiação eletromagnética porque o campo elétrico da onda causa forças diretamente opostas e conseqüentemente aceleram os elétrons e os núcleos. Argumentos similares servem para O_3 . A molécula de CO_2 é linear, mas pode facilmente ser curva, conduzindo para um dipolo induzido. Um modo vibracional transversal existe para o CO_2 em 15 μm , justamente onde a Terra emite muita da sua radiação infravermelha (Seinfeld & Padis, 1997).

2.1.2 Terra-Atmosfera e o Efeito Estufa

A atmosfera não tem seus constituintes mantidos com taxas imutáveis, e é um sistema dinâmico, com seus gases sendo trocados com vegetação, oceano e organismos biológicos. Estes processos são chamados ciclos atmosféricos e envolvem inúmeros processos físicos e

químicos (Seinfeld & Padis, 1997).

Nossa atmosfera é constituída na sua maioria de nitrogênio (78%) e oxigênio (21%), como mostra a Tabela 1. O gás oxigênio tem este alto índice de concentração na atmosfera devido aos seres vivos fotossintetizantes, e é indispensável na obtenção de energia pelo processo de respiração.

Tabela 1 – Especificações de alguns componentes atmosférico.

Gás	Massa Molecular (g/mol)	Fração Molar no ar	Densidade nas CNTP
Nitrogênio	28,01	0,78	1,250
Oxigênio	32,00	0,21	1,429
Dióxido de Carbono	44,01	0,00035	1,977
Vapor de água	18,02	0 até 0,07	0,804
Ar	28,97	1,00	1,292

Fonte:Campbell, 1998.

Há correntemente um interesse muito grande em entender o acúmulo na atmosfera terrestre de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e clorofluorcarbono (CFCs) assim chamados gases de efeito estufa, bem como sua possível conseqüência de aumento da temperatura média do planeta.

O CO₂ foi de concentração em torno de 280±15 ppm pouco antes da revolução industrial (e provavelmente desde a última era glacial) para em torno de 368 ppm atualmente (Thomson, 2000). Muito deste aumento deve-se a queima de combustíveis fósseis, queimadas e desmatamentos nas florestas tropicais (Jones, 1992).

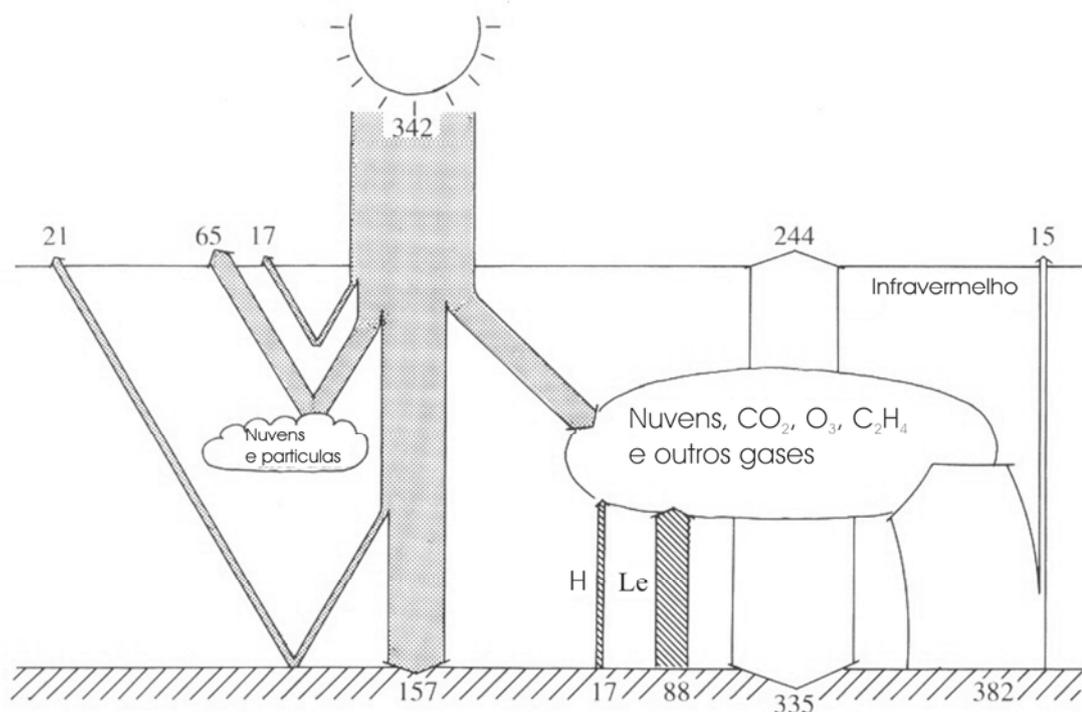


Figura 3 – Balanço de energia.

Fonte: Jones, 1992.

O simples balanço de energia como mostra a Figura 3 indica que o aumento da absorção da radiação térmica na atmosfera pode levar ao aquecimento global. O clima, entretanto, é o resultado de longos termos de extrema complexidade e o sistema dinâmico de movimento atmosférico envolve um grande número de retroalimentações que modificam estas simples previsões. O aquecimento, por exemplo, poderia aumentar a quantidade de vapor de água na atmosfera pelo aumento na evaporação e na capacidade do ar de reter esta água. E, um outro exemplo pouco menos entendido ainda, os efeitos do aquecimento global na cobertura de nuvens e do gelo polar, que constituem a maior contribuição para o albedo da Terra (Jones, 1992).

2.1.3 Processo fotossintético

A vida na Terra depende, em última análise, da energia proveniente do Sol. A fotossíntese é um processo de importância biológica que aproveita esta energia. Uma grande fração dos recursos energéticos do planeta (combustíveis fósseis) também resulta da atividade fotossintética. É um processo complexo no qual a energia solar é convertida em energia química de compostos orgânicos.

A combinação de variáveis luz e CO₂ constitui a condição importantíssima para o crescimento da planta. Ambos os fatores, luz e CO₂, são recursos críticos para a planta, que podem freqüentemente interferir no crescimento e na reprodução.

Na presença de quantidade adequada de luz, concentrações mais altas de CO₂ sustentam taxas fotossintéticas elevadas, enquanto que sob concentrações intercelulares de CO₂ muito baixas, a fotossíntese é limitada. Nas condições em que as concentrações são intermediárias, a fotossíntese é limitada pela capacidade da carboxilação da rubisco. Quando as concentrações de CO₂ são elevadas, a fotossíntese é limitada pela capacidade do ciclo de Calvin de regenerar a molécula aceptorá ribulose-1,5-bisfosfato que depende da taxa de transporte de elétrons (Taiz & Eiger, 2004).

No escuro, não há assimilação fotossintética de carbono e o CO₂ é despreendido pela respiração da planta. Warburg (1994) se deu conta de que a fotossíntese é inibida pelo O₂. Esta inibição se faz presente em todas as espécies C₃ que tinham sido estudadas desde então, e se conhece como efeito de Warburg (Salisbury & Ross, 1994).

Se for adicionado CO₂ no ar destinado à folha, tem-se uma fotorrespiração diminuída com o aumento da proporção de CO₂ em relação à do O₂ existente no cloroplasto, o que provoca um aumento da taxa carboxilativa da rubisco.

Ao contrário das plantas C₃, as C₄ não são afetadas de maneira significativa pelas concentrações variantes de CO₂, justamente porque não apresentam fotorrespiração aparente.

Os fatores como: concentração H₂O, CO₂ e nutrientes; intensidade de luz, temperatura, bem como a idade e a genética do vegetal, influenciam na fotossíntese. Mas quando a água é um fator limitante, de imediato se retarda a expansão celular, então o crescimento diminui. Se aumentar um pouco mais o estresse hídrico os estômatos se fecham e a captura de CO₂ termina.

A luz é um recurso crítico para planta, podendo limitar o crescimento e a reprodução. No caso de plantas C₃ e C₄ só há o processo fotossintético na presença de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), correspondente à radiação visível (luz). Tais plantas, se aumentar a intensidade de radiação, vão aumentar a taxa de fixação de CO₂ ao menos inicialmente, onde a taxa de fixação responde ao incremento da densidade de fluxo fotossinteticamente ativo. Tendo em seguida um ponto conhecido como saturação de luz, onde o aumento na intensidade de luz não resulta em um aumento de taxa de fixação de CO₂, (Salisbury & Ross, 1994). Este ponto varia com a espécie, com a irradiância durante o crescimento e também com a concentração de CO₂.

Não é possível determinar que fator, entre CO₂ e luz, é mais limitante na fotossíntese

da planta C_3 porque ambos podem ser limitantes, e não necessariamente para a mesma folha. As folhas do topo da árvore são mais iluminadas, e quase sempre respondem ao aumento de concentração de CO_2 , já as folhas da porção inferior podem estar saturadas de CO_2 e respondem mais à luz adicional (Lima Jr, 2006).

2.1.4 Balanço de Energia

Uma lei física básica é a da conservação de energia. Que comumente é enunciada como: a energia não pode ser criada nem destruída, mas pode ser transformada. O balanço de energia é usado para investigar aspectos particulares do meio ambiente e o controle fisiológico de evapotranspiração.

O balanço de energia para uma floresta geralmente é dado pela equação:

$$R_n + G + L_e + H + S = 0 \quad (5)$$

Onde R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo através da superfície do solo, L_e é o fluxo de calor latente, H é o fluxo de calor sensível e S é o calor armazenado.

O saldo de radiação, R_n , é o termo dominante na equação 5, não somente porque é frequentemente maior, mas por tendenciar outros fluxos de energia.

O fluxo de calor latente determina a evapotranspiração que tende a ser maior em cobertura em cobertura vegetal mais densa e em ambientes mais úmidos. A evapotranspiração é o processo de transferência de vapor d'água das superfícies vegetadas, pelos processos físicos simultâneos da evaporação (do solo) e transpiração (controlada pela abertura dos estômatos), sendo assim dependente do tipo de cobertura vegetal.

A energia armazenada (S) na biomassa, na liteira, e/ou no solo muitas vezes em experimentos é ignorada porque a energia estocada durante o dia é igual a perda durante a noite (Vourlitis, 2004), e também por usualmente ter valores relativamente baixos comparado com o saldo de radiação (menos que 5%) (Jones, 1992).

2.2 MICROMETEOROLOGIA - MÉTODO DA CORRELAÇÃO DE VÓRTICES TURBULENTOS (EDDY COVARIANCE)

Técnicas micrometeorológicas fornecem meios de alternativas para medidas de trocas

gasosas entre a biosfera e a atmosfera. O método micrometeorológico tem muitas vantagens. Primeira, ela está no local de pesquisa e não altera o ambiente em volta do dossel. Segunda, estas técnicas seguem medidas contínuas. Terceira, medidas micrometeorológicas de média temporal em um ponto fornecem um área integrada, média das taxas de trocas entre a superfície e a atmosfera (Baldochi et al., 1988).

A taxa de variação de concentração de um elemento químico no tempo em um ponto fixo do espaço é igual a advecção horizontal e vertical média, a média horizontal e vertical da divergente e convergente da turbulência, a difusão molecular, e também a presença de sumidouros e fontes, como por exemplo as folhas das plantas.

$$\frac{d\bar{\chi}}{dt} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u'\chi'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'\chi'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'\chi'}}{\partial z} + D + S + \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial t} \quad (6)$$

Onde χ é a concentração de um elemento químico (massa do elemento por unidade de volume de ar seco) e u , v e w são as componentes da velocidade do vento frontal, lateral e vertical, respectivamente, que opera nas respectivas direções longitudinal (x), lateral (y), e vertical (z). D é a difusão molecular e S é um termo de fonte/sorvedouro. As barras sobre as letras indicam médias, e os apóstrofes denotam flutuações com relação à média.

Segundo Baldochi (1988), a covariância entre as flutuações da média da componente vertical e as flutuações da média da concentração χ é igual ao fluxo turbulento médio de matéria através de uma superfície horizontalmente homogênea. Para isto assumimos que a difusividade molecular devido à agitação térmica aleatória seja desprezível com relação ao fluxo turbulento, que não haja sorvedouros ou fontes na atmosfera acima da superfície, que a concentração do elemento químico não varie significativamente com o tempo, e também assumimos que o fluxo seja constante com a altura em uma bem ajustada camada limite interna. Assim temos:

$$F = -\bar{\rho}_a \overline{w'\chi'} \quad (7)$$

Onde ρ_a é densidade do ar seco. O fluxo é direcionado para baixo quando $F < 0$ e direcionado para cima quando F é positivo.

Sendo:

$$w' = (w - \bar{w}) \quad (8)$$

$$\chi' = (\chi - \bar{\chi}) \quad (9)$$

O índice “barra” das equações 8 e 9 (\bar{w} e $\bar{\chi}$) simboliza a média no intervalo de tempo correspondente à média móvel.

Assim, $w'\chi'$ é a covariância média entre as flutuações (com relação média móvel, como visto na equação 8) da velocidade do vento vertical e as flutuações da concentração do gás.

A equação 7 é base para o método de correlação de vórtices turbulentos. Apesar dessa equação parecer simples, o método requer adequada turbulência e necessita de equipamentos caros e sensíveis. Além disso, há outras dificuldades associadas ao tempo de resposta do sensor, à distância de separação entre os sensores, à altura da tomada de dados acima da superfície, ao intervalo do período de amostragem, a orientação do sensor, ao ruído do sinal, e à razão de amostragem que dever ser rejeitada em ordem para a medida correta do fluxo turbulento vertical (Baldochi et al., 1988; Goulden et al., 1996; Moncrieff et al., 1996). Com todas estas precauções, ainda não podemos esquecer das suposições para a medida do fluxo já citadas.

2.3 TEORIA DA COMPLEXIDADE

A complexidade é uma idéia integrante da nossa experiência cotidiana, que pode ser encontrada em diferentes contextos. Porém, muitos livros de Física tradicionais – tratando da queda de objetos sobre influência da gravidade, ou movimento de um pendulo – são fundamentalmente “simples”. Parecem simples por apresentarem somente um objeto e uma ação (ou poucas) envolvidas no fenômeno. Em contraponto, os sistemas reais como a economia, a linguagem, o cérebro de mamíferos e comunidade de plantas, são considerados sistemas complexos por apresentarem um considerável número de interações entre os elementos ou fatores evolidos (Prigogine, 1998).

A ciência clássica prioriza a ordem e a estabilidade, enquanto que em todos os níveis de observação é reconhecido hoje o papel primordial da instabilidade e das flutuações, levando a noções de escolhas múltiplas e de previsibilidade limitada. A ciência clássica também estuda sistemas fechados e em equilíbrio, enquanto que a Teoria da Complexidade

estuda os sistemas aberto e distantes do equilíbrio.

2.3.1 Espaço de fase

Um dos mais familiares sistemas conservativos é o pêndulo. Denominando o comprimento do pêndulo por l e o ângulo verticalmente para baixo por θ , a hamiltoniana, que para sistemas conservativos é a energia total do sistema, é dada por:

$$H = ml \left[\frac{1}{2} l \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + g(1 - \cos \theta) \right] \quad (10)$$

O espaço de fase é muito usado para verificação da evolução de um sistema, no caso do pêndulo, o espaço de fase é plano formado pelas variáveis envolvidas no sistema, no caso do pêndulo as variáveis, dadas pela equação 10, são o ângulo θ e a velocidade angular $d\theta/dt$.

A dimensionalidade do espaço de fase é o número mínimo de variáveis necessárias para especificar o estado dinâmico do sistema (Hilborn, 2000).

No espaço de fase do pêndulo em um sistema conservativo, temos que a evolução do sistema é cíclica, mas quando considerado o atrito (sistema dissipativo, sendo mais próximo da realidade) o sistema tende a parar, isto é, o pêndulo vai perdendo amplitude e velocidade angular, visto no espaço de fase como um espiral chegando ao centro do gráfico (ponto 0,0), assim o estado preferencial do sistema é estar parado. A este estado preferencial, seja ele ponto, curva, plano ou qualquer foram generalizada, de dimensão inteira ou não, ou até mesmo um conjunto de pontos no espaço de fase de dimensão n é dito **atrator** do sistema. Em geral, os sistemas naturais são sistemas complexos que exibem comportamento fractal.

2.4 RECONSTRUÇÃO DO ESPAÇO DE FASE A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS

2.4.1 Dimensionalidade do atrator

Observações reais de evoluções regulares podem ser consideradas tipicamente como medida de um simples escalar em um ponto espacial fixo: chamada medida quantitativa $X(t_o + m\tau_s) = X(m)$, onde t_o é o tempo inicial e Δt é o tempo de amostragem do instrumento usado no experimento (Abarbanel, 1993). Essas séries temporais poderiam ser a diferença de potencial

ou a corrente em um circuito não linear, a velocidade de um fluido dinâmico ou o movimento de um plasma, poderiam ser também medidas ambientais e atmosféricas como temperatura, fluxo de energia e de massa.

Séries temporais são ricas em informações, pois além dos dados individuais, trás consigo um padrão característico da variável. Também, quando analisamos uma variável de um ponto de vista unidimensional, estamos na realidade levando em conta um grande número de variáveis interdependentes (Nicolis & Prigogine, 1998).

Uma primeira idéia para reconstrução do espaço de fase de um sistema pela informação de medidas experimentais escalares $X(m) = X(t_0 + m \Delta t)$ foi o uso de equações diferenciais, porém o estudo mostrou que as derivas de $X(m)$, com o intuito de encontrar a trajetória da órbita no espaço de fase, perdiam informação pela aproximação numérica das soluções das derivadas. Segundo Albarbanel (1993), por volta de 1980 um grupo da Universidade da Califórnia de Santa Cruz e David Ruelle, simultaneamente e independentes um do outro, introduziram a idéia de usar defasagens temporais para reconstrução do espaço de fase de sistemas dinâmicos observados.

Um forma muito conveniente de reconstruir a dinâmica do sistema se dá a partir da obtenção de variáveis $\{X_k(t)\}$ (sendo $k = 1, \dots, n - 1$) conhecendo somente $X_0(t)$. Consiste em desmembrar a série temporal original $X_0(t)$ em deslocamentos temporais sucessivos de defasagem fixa τ ($\tau = m \Delta t$, onde m é um número inteiro) para N pontos equidistantes do conjunto de dados. Isto é:

$$\begin{aligned}
 X_0 &: X_0(t_1), \dots, X_0(t_N) \\
 X_1 &: X_0(t_1 + \tau), \dots, X_0(t_N + \tau) \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 &\cdot \\
 X_{n-1} &: X_0[t_1 + (n-1)\tau], \dots, X_0[t_N + (n-1)\tau]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Podemos ver o poder da reconstrução de sistema por análise de séries temporais com um exemplo de modelo matemático com comportamento caótico que foi sugerido por Otto Rössler (1976). Neste modelo há três variáveis e um termo não linear quadrático:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + ay \\ \frac{dz}{dt} = bx - cz + xz \end{cases} \quad (12)$$

Na Figura 4 está esboçado o resultado das equações do modelo de Rössler no espaço de fases, usando $dt = 0,01$ e um numero de amostragem de 10000, para $a = 0,32$, $b = 0,3$ e $c = 4,5$. E na Figura 5 está a serie temporal $x(t)$, cujo o resultado tem origem na solução do modelo matemático proposto por Rössler.

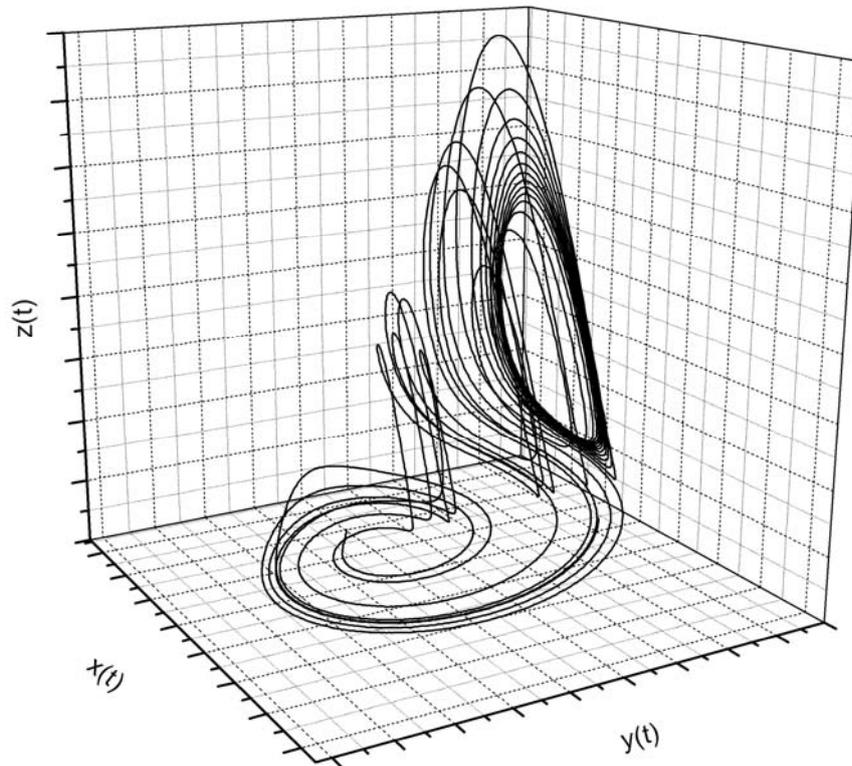


Figura 4 – Atrator caótico obtido por integração numérica do modelo de Rössler, com $a = 0,32$, $b = 0,3$ e $c = 4,5$.

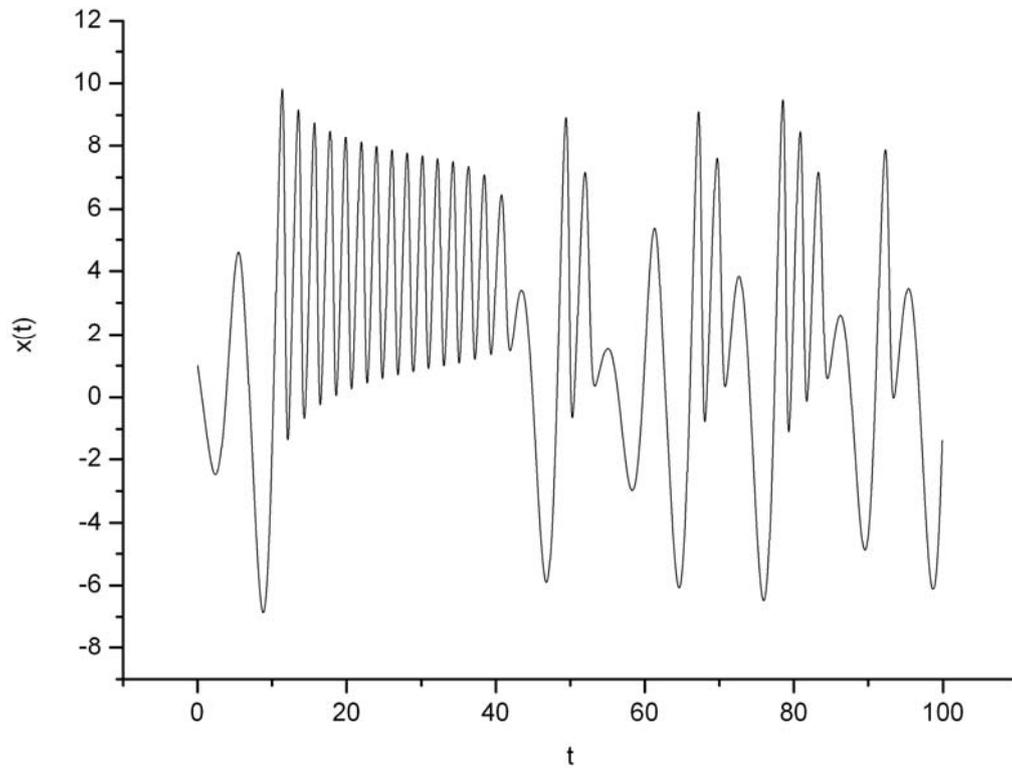


Figura 5 – Solução da componente $x(t)$ das equações de Otto Rössler.

A idéia da reconstrução da dinâmica do sistema por meio de serie temporal usando o artifício da defasagem temporal é vista em ação na Figura 6. Comparando a Figura 4 e a Figura 6 vemos que a geometria e os traços complicados são semelhantes, porém na figura 6 um pouco distorcidos. Assim, através da defasagem é possível traçar um “retrato” do atrator.

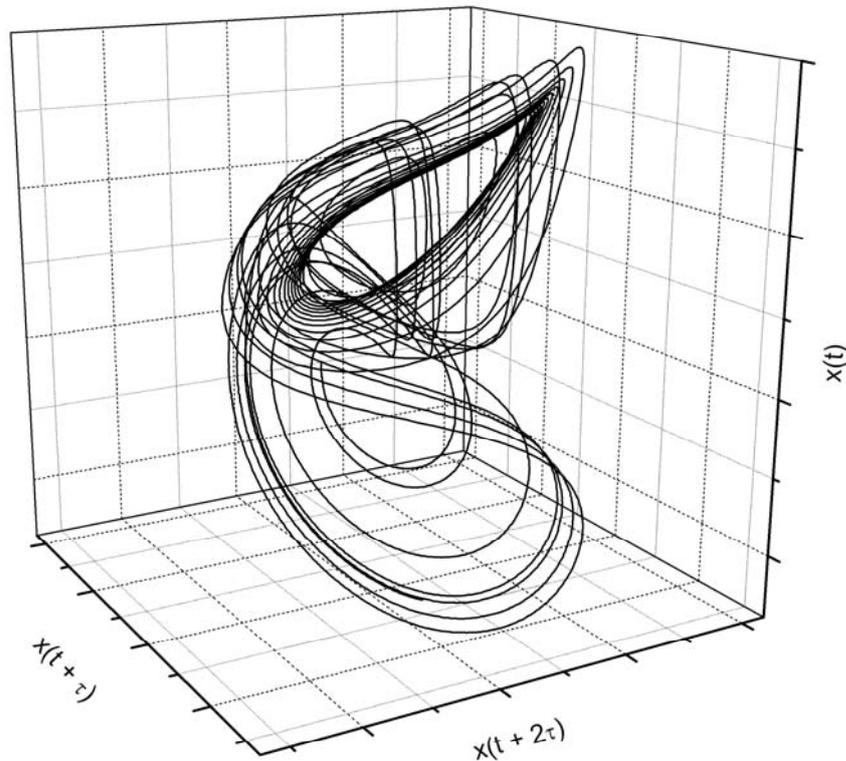


Figura 6 – Reconstrução do atrator de Rössler por meio de defasagem de série temporal da componente $x(t)$.

Qual defasagem temporal usar? Nicolis & Prigogine (1998) afirmam que a escolha da defasagem (τ) deve ser aquela na qual a série original ($X_0(t)$) e a série defasada ($X_1(t_N + \tau)$) apresentarem a menor correlação. Já Mañé e Takens afirmam que não importa qual é a escolha da defasagem temporal. Eles discutem que o atrator simplesmente suavemente aparece no espaço de fase de coordenadas defasadas como se vista nas coordenadas originais, que não são conhecidas. Isto quando a dimensão do espaço de fase, n , é suficientemente maior que a dimensionalidade do atrator, d ($n > 2d$).

Segundo Abarbanel (1993), o uso de um τ muito pequeno implica em $X(t_N + m\tau)$ e $X(t_N + (m + 1)\tau)$ terem valores próximos e as séries tornam-se indistinguíveis. Na prática, as séries são duas coordenadas dependentes. Igualmente, o uso de um τ muito grande acarreta em $X(t_N + m\tau)$ e $X(t_N + (m + 1)\tau)$ serem completamente diferentes uma da outra. Uma escolha de τ que pode ser adequada é a independência linear das coordenadas, porém Abarbanel (1993) prefere o ponto de vista na qual a escolha seja feita através do estresse de um importante aspecto no comportamento caótico – o ponto de vista da teoria da informação, onde a escolha

da defasagem é aquela onde se tem o primeiro mínimo em um gráfico de informação mutual média por τ .

Muitos estudos estão sendo conduzidos desde duas décadas, explorando as implicações de modelos para várias quantidades invariantes sob a dinâmica, tais como a dimensionalidade do atrator e os expoentes de Lyapunov do sistema. Estes fatores invariantes são bases para verificação de modelos; são independentes das condições iniciais do sistema e não são sensíveis a pequenas perturbações em uma órbita, quando órbitas individuais do sistema são exponencialmente sensíveis a essa perturbação (Albarbanel, 1993).

A quantidade de interesse é a dimensionalidade do atrator ou também conhecida como dimensão de Hausdorff, esta quantidade tem chamado muita atenção de físicos, que se utilizam do termo dimensão fractal. A dimensão de um conjunto é aproximadamente a quantidade de informação necessária para especificar pontos na sua exatidão (Eckmann & Ruelle, 1985).

Por trás de um conceito simples de dimensão (d), como número mínimo de coordenadas necessário para especificar um estado, estão conceitos geométricos como escalas de volume (V , podendo ser um hipervolume) ou área em função de um parâmetro de comprimento (L) característico.

$$V \propto L^d \quad (13)$$

Assim a dimensão é definida matematicamente como:

$$d = \frac{\log V}{\log L} \quad (14)$$

Uma forma semelhante foi dada por Eckmann & Ruelle (1985), fazendo S ser um conjunto compacto e assumimos que $N(\varepsilon)$ “bolas” de raios ε são necessária para cobrir S . A dimensão d , a “capacidade” de S , é definida por:

$$d = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}} \right) \quad (15)$$

As análises por meio de dimensão podem ser feitas de forma puramente geométrica, como sendo o número para expressar a quantidade de informação necessária para especificar

um estado da precisão de r (raio da hipersfera), comumente chamada de dimensão de informação (Abarbanel, 1993). Outra análise é a dimensão de correlação, também chamada de dimensão embutida, e é definida como:

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (16)$$

Sendo que $C(r)$ é a função correlação dada por:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \quad (17)$$

Para determinação de $C(r)$ pela equação 17 primeiramente adota-se um ponto de referência X_i no espaço de fase, partir desse ponto e com o auxílio da função de Heaviside, θ , é contado o numero de pontos dentro do raio da hipersfera (r) e conseqüentemente a medida de quanto a presença deste ponto de referência influencia na posição dos demais dados, que é propriamente a função correlação. Este procedimento é feito para todos os dados, sendo a cada seção um dado tomado como referência.

Pela equação (16) quanto maior a contagem $C(r)$ para um mesmo raio r , menor será a dimensionalidade do atrator d .

A função de Heaviside, usada na equação 17, é também chamada de função degrau, pois:

$$\theta(u) = \begin{cases} 0, & u \leq a \\ 1, & u > a \end{cases} \quad (18)$$

Na prática, a inclinação máxima das linhas no gráfico de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (gráfico “joelhos”) é a dimensão embutida, e esta dimensão embutida aumenta com a dimensão do espaço de fase até saturar, quando isto ocorre, a dimensão embutida é igual a dimensão do atrator. Pois quanto maior a dimensão do espaço de fase maior também será a abrangência ou capacidade de definir o atrator. Assim, a dimensionalidade do atrator é dada para a dimensão do espaço de fase que corresponde ao número mínimo de variáveis para explicar o sistema (graus de liberdade).

Segundo Eckman & Ruelle (1985) em sistemas dissipativos o volume ocupado pelo atrator é em geral relativamente muito pequeno comparado com o volume do espaço de fase.

3 Material e Métodos

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Os dados foram coletados numa torre de 42 m onde funciona o sistema de correlação de vórtices turbulentos (Eddy Covariance) a aproximadamente 50 Km da cidade de Sinop (Figura 7), no estado noroeste do estado de Mato Grosso (11°24,75'S 55°19,50'N), em uma floresta madura e intacta, com um dossel contínuo de altura entre 26 m a 28 m, em terreno plano a 423 m do nível do mar. A área de estudo é caracterizada por clima tropical úmido, com duas estações definidas, uma estação seca de junho a agosto, e uma estação chuvosa de dezembro a fevereiro, com uma temperatura média anual de 24°C e precipitação de 2000 mm/ano (Miranda et al., 2004). A mata é constituída por árvores de floresta de transição entre cerrado e floresta amazônica. Tem solo arenoso, pobre em nutrientes e bem drenado (Vourlitis et al. 2001).



Figura 7 - Local de Estudo.

Fonte: Vourlitis (2001).

3.2 COLETA DE DADOS

As variáveis estudadas foram coletadas no período de 2001 a 2006, porém sendo analisadas somente séries de dados referentes a meses de estação chuvosa ou seca, com uma seqüência ininterrupta. Ao total foram três séries temporais do período de estação seca e três séries temporais de estação chuvosa. As variáveis em questão são o fluxo de calor latente e sensível, fluxo de CO₂, temperatura, concentração de CO₂ e de H₂O, velocidade do vento e velocidade de fricção.

O sistema de correlação vórtices turbulentos, antes de 2005 (meses fevereiro de 2001, junho e julho de 2002, e fevereiro de 2003), era composto por um anemômetro-termometro sônico tridimensional (SWS-211/3K, Applied Technologies, Inc., Boulder, Colorado, E.U.A.), por um analisador de gás por infravermelho (NOAA-ATDD, Oak Ridger, Tennessee, USA), por um conversor analógico/digital (datapacker) e pelo sistema de aquisição de dados. O sistema de aquisição utilizava um datalogger (CR 10X, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah) e um laptop onde processava os fluxos utilizando uma filtragem digital recursiva (média móvel) de 200 s e controlava o armazenamento das médias de 30 minutos das variáveis. O analisador de gás teve a calibração do ponto de orvalho a cada 4 semanas. Para

essa calibração, que consiste na obtenção da temperatura para a qual o vapor de água presente na atmosfera satura o ar e começa a condensar-se, isto é, começa a formar-se o orvalho, foi utilizado o gerador de ponto de orvalho portátil LI 610 (LICOR, Inc., Lincoln, Nebraska, E.U.A.). O analisador de gás também teve calibrações para CO₂, com a mesma frequência, utilizando dois cilindros com concentrações diferentes de gás carbônico (305 ppm e 406 ppm), assim foi possível converter os valores da concentração de CO₂ em voltagens para ppm, e também obter o fluxo de CO₂.

Em 2005, o sistema de correlação de vórtices turbulentos foi alterado e a torre passou por uma reforma. O anemômetro sônico tridimensional foi trocado por outro (CSAT3: 3-D anemometer sonic, Campbell, USA). Foi trocado também o analisador de gás (CO₂, H₂O) por infravermelho de circuito aberto, sendo o atual do modelo LI-7500 do fabricante LI-COR, USA. O sistema de aquisição passou a ser constituído por um datalogger (CR-5000: Campbell, USA), que dispensa a utilização de um computador portátil.

Todos os dados foram coletados com uma frequência de 10 Hz (0,1 em 0,1 segundos) e armazenados em média de 30 min. Os fluxos de energia e matéria (fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e fluxo de CO₂) foram analisados com uma média móvel de 200 s.

3.3 SELEÇÃO DE DADOS E PREENCHIMENTO DE FALHAS

Uma preocupação com a qualidade dos dados das séries temporais foi a determinação dos valores mínimos e máximos possíveis. Assim, foi tomado como referência para o condicionamento dos dados, o limite inferior e superior do boxplot. Sendo o limite inferior (*LIBP*) e o limite superior do boxplot (*LSBP*) tidos como:

$$\begin{aligned} LIBP &= Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \\ LIBP &= Q_1 + 1,5(Q_3 - Q_1) \end{aligned} \tag{19}$$

Onde Q_1 e Q_3 são o primeiro quartil e terceiro quartil, respectivamente.

No lugar dos dados retirados foi repetido o valor do dado anterior, visto que a característica principal das series é o tempo, e que o ato de repetir valores implica em uma operação quase neutra para o estudo da complexidade das variáveis.

3.4 OBTENÇÃO DA DIMENSIONALIDADE DO ATRATOR E DA DIMENSIONALIDADE MÍNIMA

O método proposto consiste em analisar o atrator das variáveis, determinando sua dimensionalidade (d) e o número mínimo de variáveis necessárias, ou graus de liberdade, para compreensão de uma variável específica (n), que também corresponde a dimensão do espaço de fase necessária para descrição da evolução do sistema.

A dimensionalidade do atrator, d , dá informações válidas da dinâmica do sistema. Se $d = 1$, temos uma auto-sustentável oscilação periódica; se $d = 2$, o sistema apresenta oscilações quase-periódicas de duas frequências independentes; se d é um não-inteiro e maior que 2, espera-se que o sistema exiba uma oscilação caótica devido a uma sensibilidade as condições iniciais, bem como uma imprevisibilidade intrínseca (Prigogine, 1998).

Foi escolhida uma defasagem temporal (τ), para determinação da função correlação, igual a 5,5 h ($m\Delta t = 11 \times 30 \text{min}$), com base no argumento apresentado por Prigogine e Nicolis (1998), sendo a defasagem τ escolhida aquela na qual se tem a menor correlação entre a série original e a série defasada.

O valor para defasagem temporal assumida no trabalho para todas as variáveis, pela pouca correlação apresentada entre a série original e a mesma série defasada em 5:30 h para o fluxo de carbono nos meses de fevereiro de 2001, e junho e julho de 2002, vistos nas Figuras 8 e 7, respectivamente.

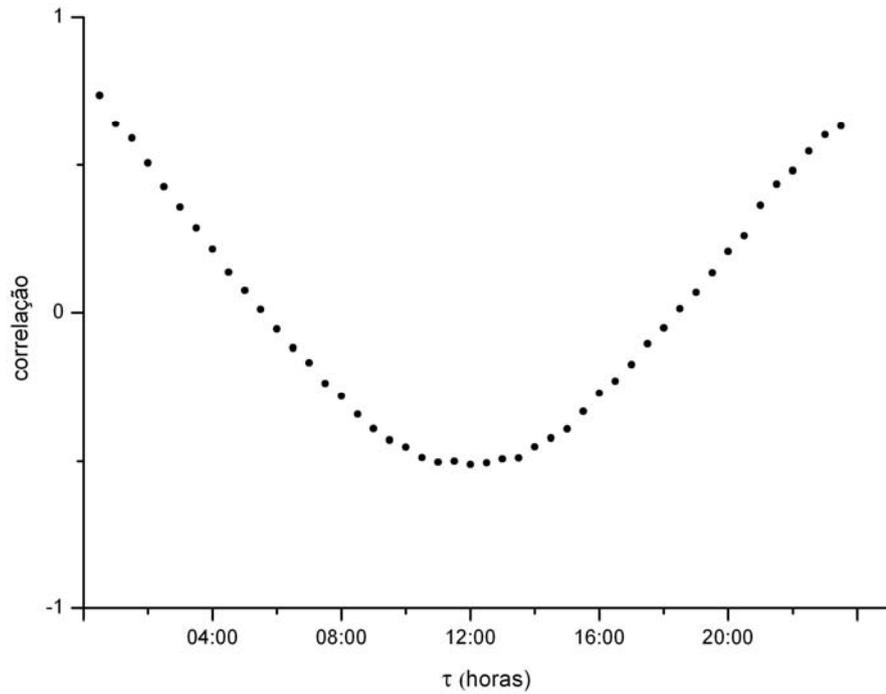


Figura 8 - Comportamento da correlação entre a serie temporal do mês fevereiro de 2001 para o fluxo de CO₂ e a mesma série defasada em τ .

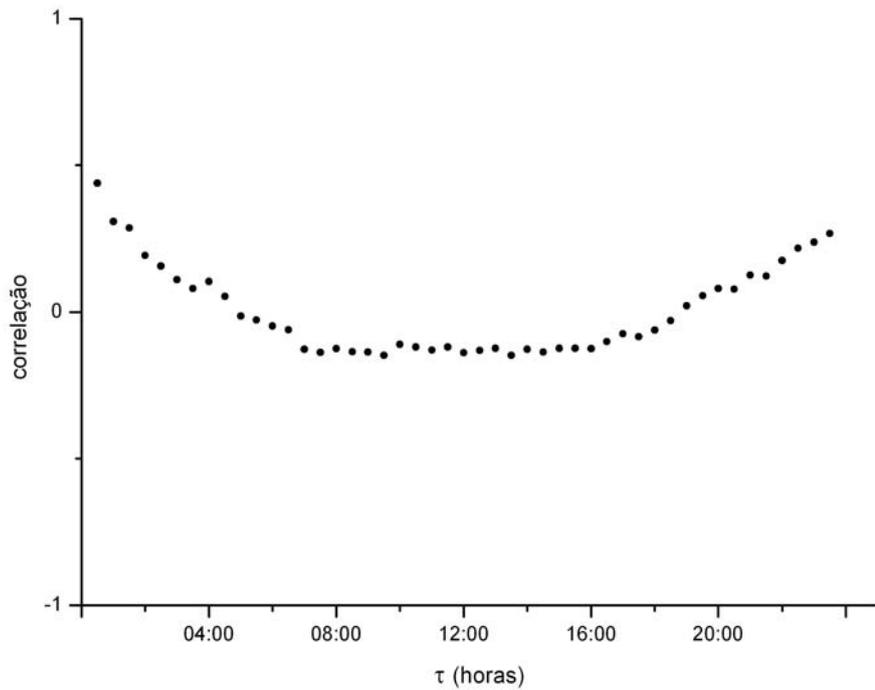


Figura 9 - Comportamento da correlação entre a serie temporal do período de julho e julho de 2002 para o fluxo de CO₂ e a mesma série defasada em τ .

Com as séries tratadas e preenchidas foi calculada a função correlação ($C(r)$) (equação 17), utilizando um programa feito em C++, para sucessivos valores de dimensionalidade do espaço de fase, como mostra a Figura 10, chamado de gráfico “joelhos”, pois é bem comum que em um gráfico de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ apresente aspectos de joelhos.

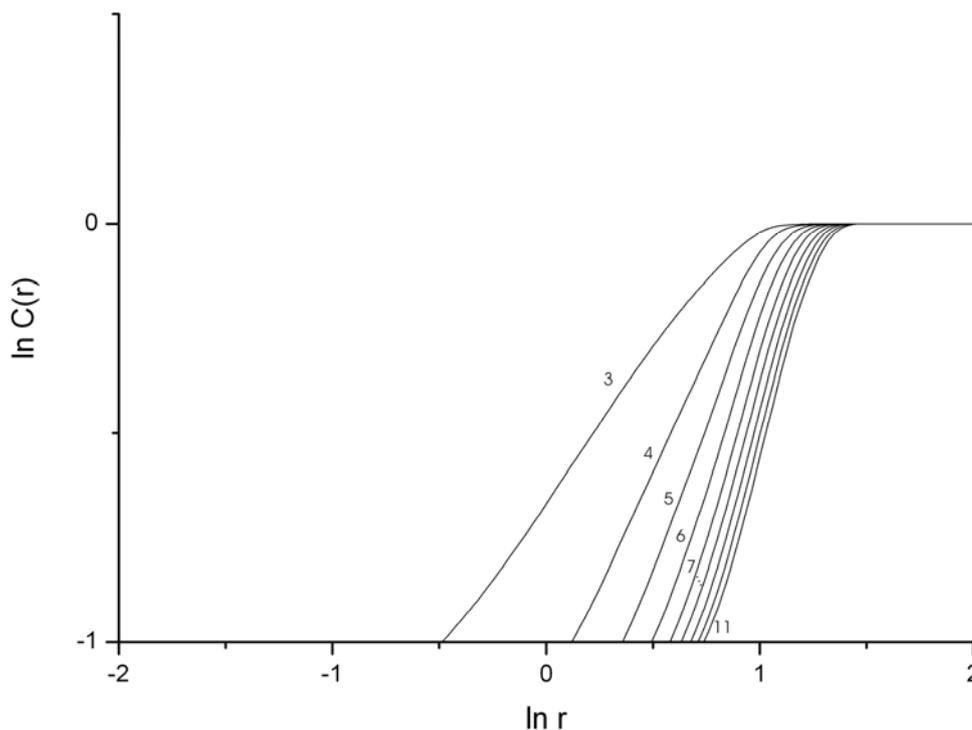


Figura 10 – Gráfico “joelhos”, que representa as linhas de $\ln C(r)$ versus $\ln r$ para diferentes dimensão do espaço de fase.

A Figura 10 mostra a função correlação para diferentes dimensões do espaço de fase. A dimensionalidade do atrator é aquela na qual há uma saturação da inclinação máxima do gráfico “joelhos” com o aumento da dimensão do espaço de fase, como visto na Figura 11.

As linhas no gráfico $\ln C(r)$ versus $\ln r$ (gráfico “joelhos”) correspondem a diferentes dimensões do espaço de fase. Foi calculada a inclinação máxima para cada linha (dimensão embutida, dada pela equação 16). E, é comum que as inclinações máximas aumentem com a dimensão do espaço de fase até saturem; eis então, que obtemos a dimensionalidade do atrator e a dimensionalidade mínima necessária para a compreensão da variável analisada (quantas outras variáveis são necessárias explicar a variável em questão).

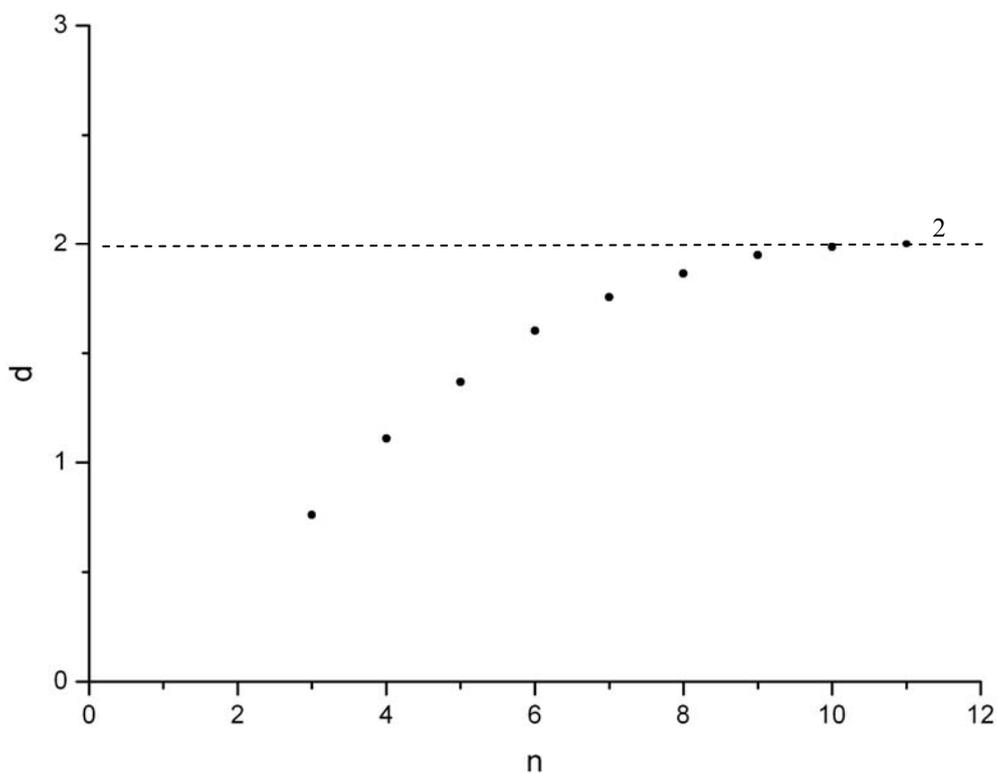


Figura 11 - Tendência da dimensão embutida (d) com o aumento da dimensão do espaço de fase (n), enfatizando a sua saturação, onde se dá a dimensionalidade do atrator e a dimensionalidade mínima.

Também na Figura 11 é possível determinar o número mínimo de variáveis (graus de liberdade), que é a dimensão do espaço de fase onde se tem a saturação da inclinação máxima em $\ln C(r)$ versus $\ln r$. Note que d é necessariamente menor que n . Os graus de liberdade são importante para modelos matemáticos, pois com antecedência é possível ver quantas variáveis são necessárias para se modelar a variável independente. Porém será d que indicará quão difícil é compreender essa variável.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DA DIMENSÃO EMBUTIDA

As Figuras 12 até 19 mostram o comportamento da dimensão embutida com o aumento da dimensão do espaço de fase para concentração de CO₂ e H₂O, para fluxo de calor latente e sensível, para temperatura e velocidade do vento; nas séries dos meses de fevereiro de 2001, junho e julho de 2002, fevereiro de 2003, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006 e agosto de 2006. É válido lembrar que onde há a saturação da dimensão embutida (inclinações das linhas no gráfico $\ln C(r)$ versus $\ln r$), essa dimensão é igual a dimensão do atrator; e também na saturação obtemos a dimensionalidade mínima, que é o número mínimo de variáveis necessário para compreensão da variável em questão.

A Figura 12 e 13 referem-se à dimensão embutida da concentração de CO₂ e de H₂O, respectivamente; a Figura 14 à dimensão embutida do fluxo de CO₂; a Figura 15 e 16 à tendência da dimensão embutida dos fluxos de calor latente e calor sensível, respectivamente; a Figura 17 à da temperatura; a Figura 18 e 19 mostram a tendência da dimensão embutida para velocidade do vento e velocidade de ficção, respectivamente.

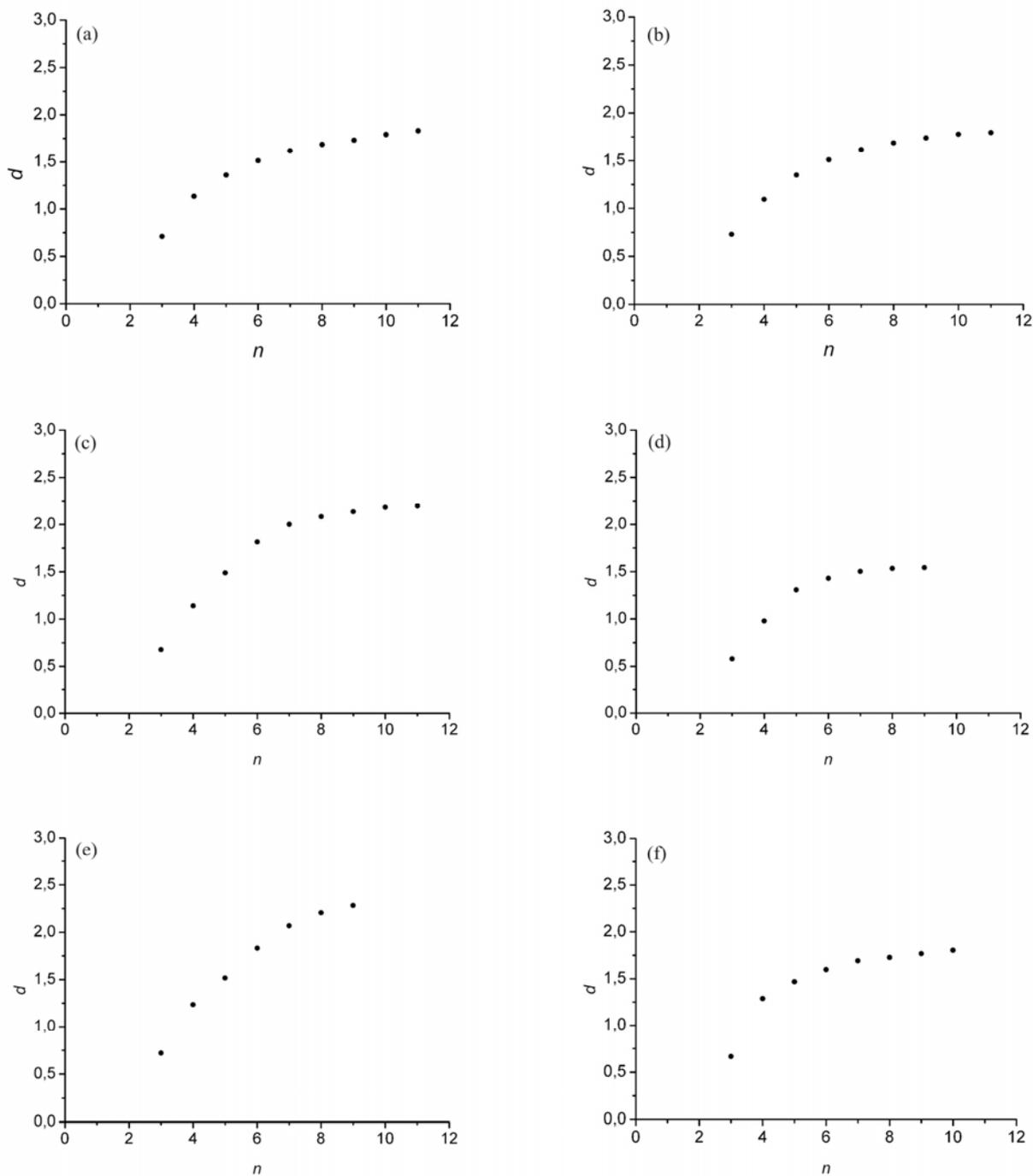


Figura 12 – Comportamento da dimensão embutida, d , para concentração de CO₂, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

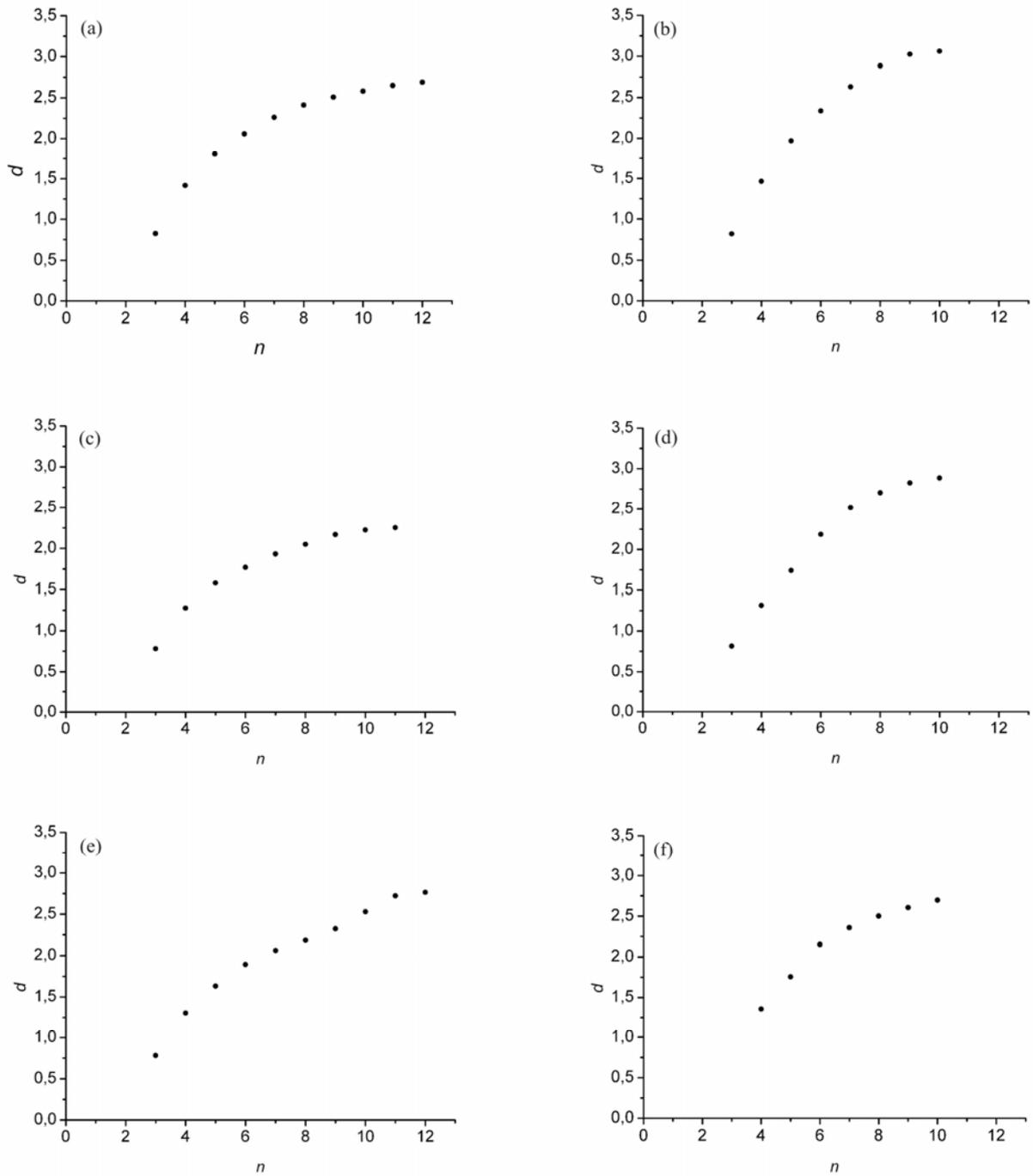


Figura 13 Comportamento da dimensão embutida, d , para concentração de H_2O , sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

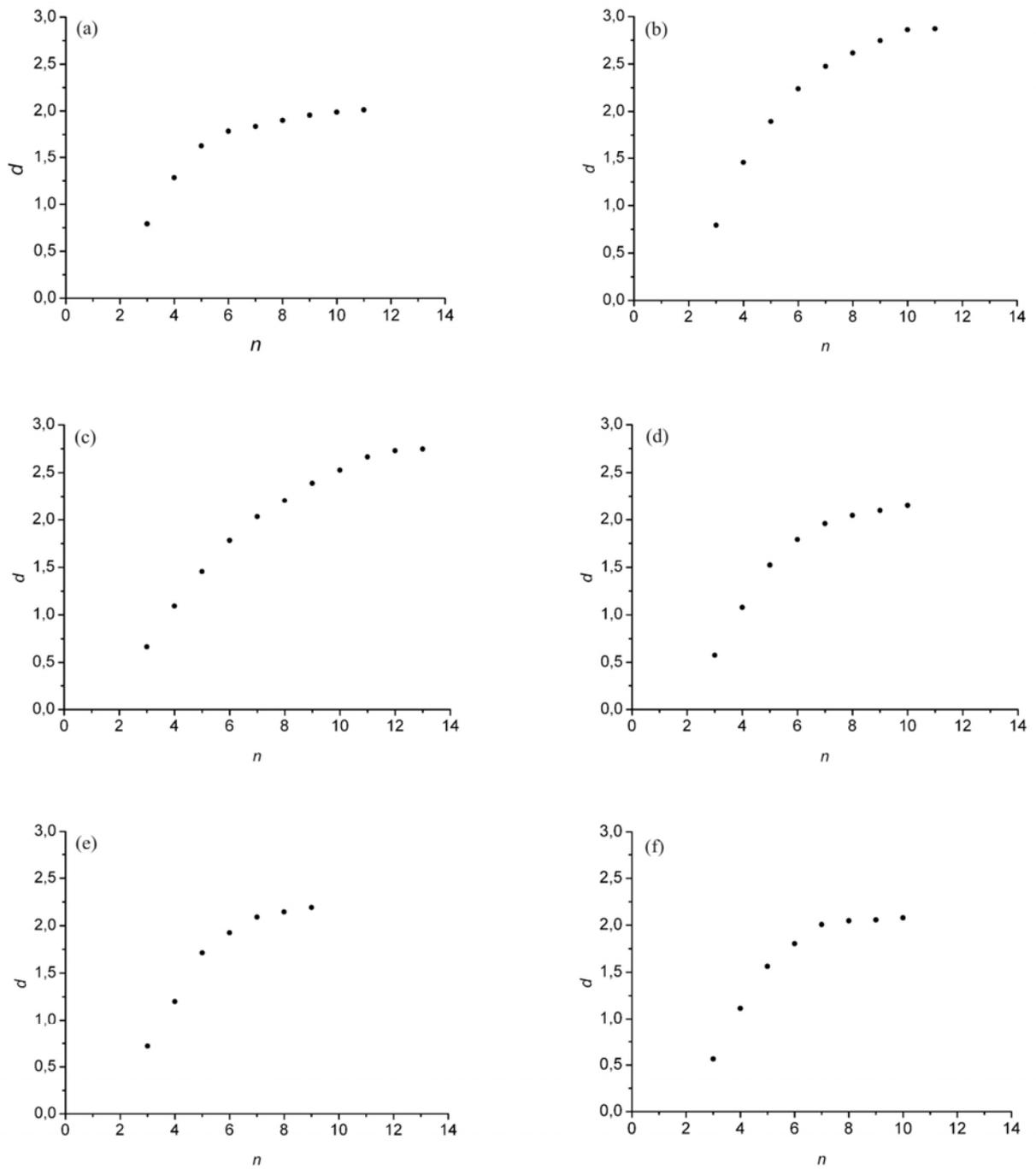


Figura 14 – Comportamento da dimensão embutida, d , para o fluxo de CO₂, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

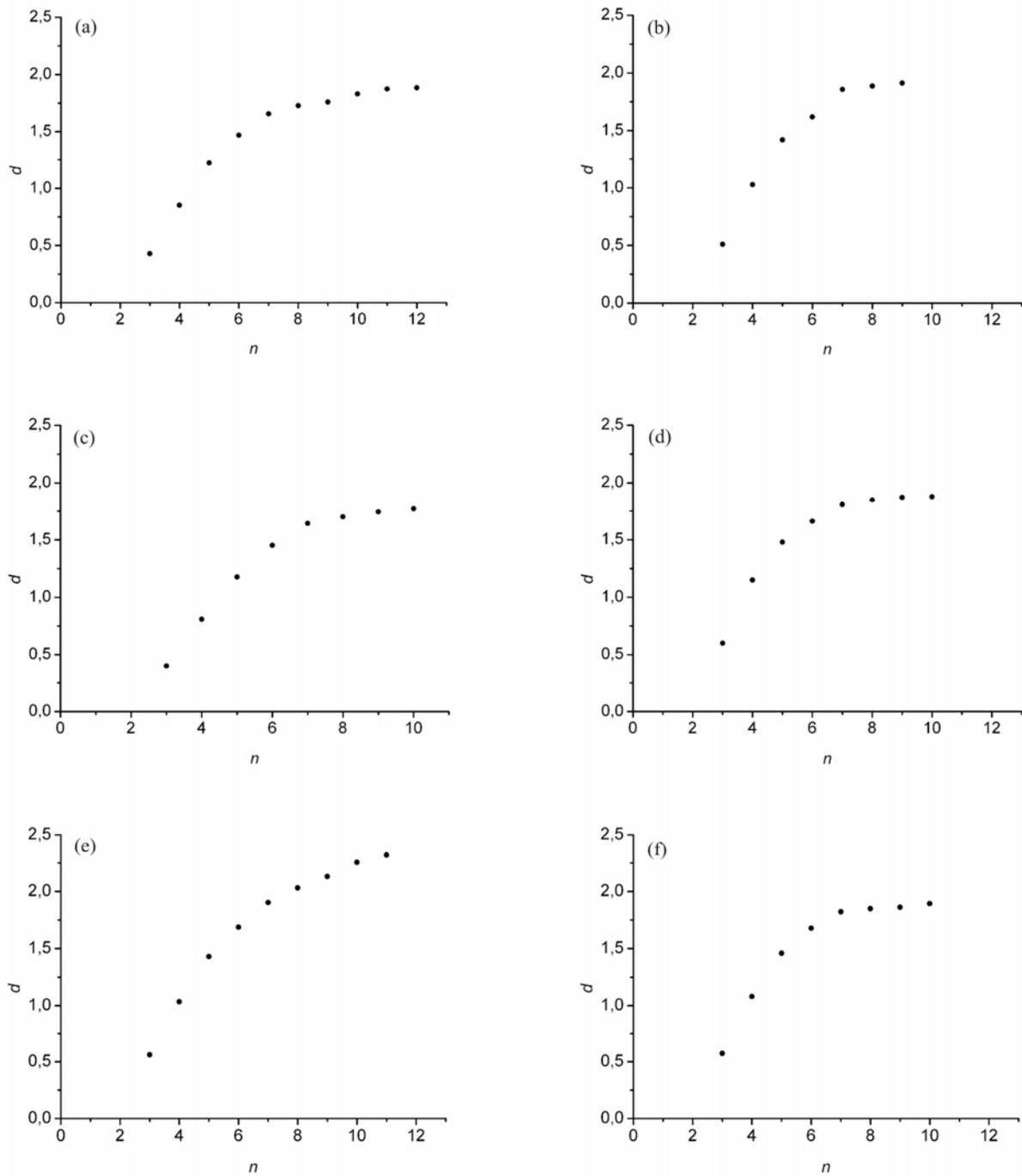


Figura 15 – Comportamento da dimensão embutida, d , para o fluxo de calor latente, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

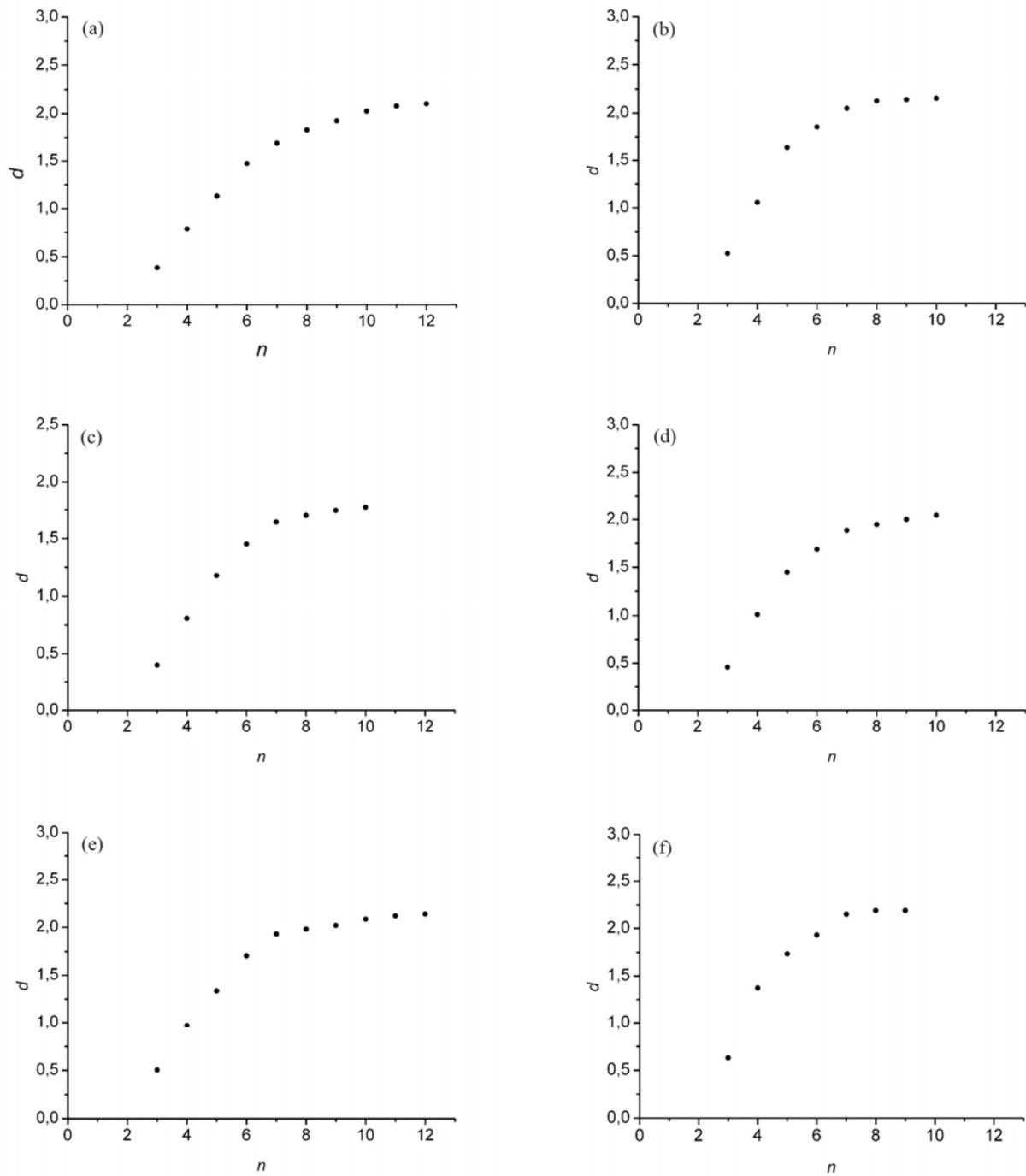


Figura 16 – comportamento da dimensão embutida para o fluxo de calor sensível, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

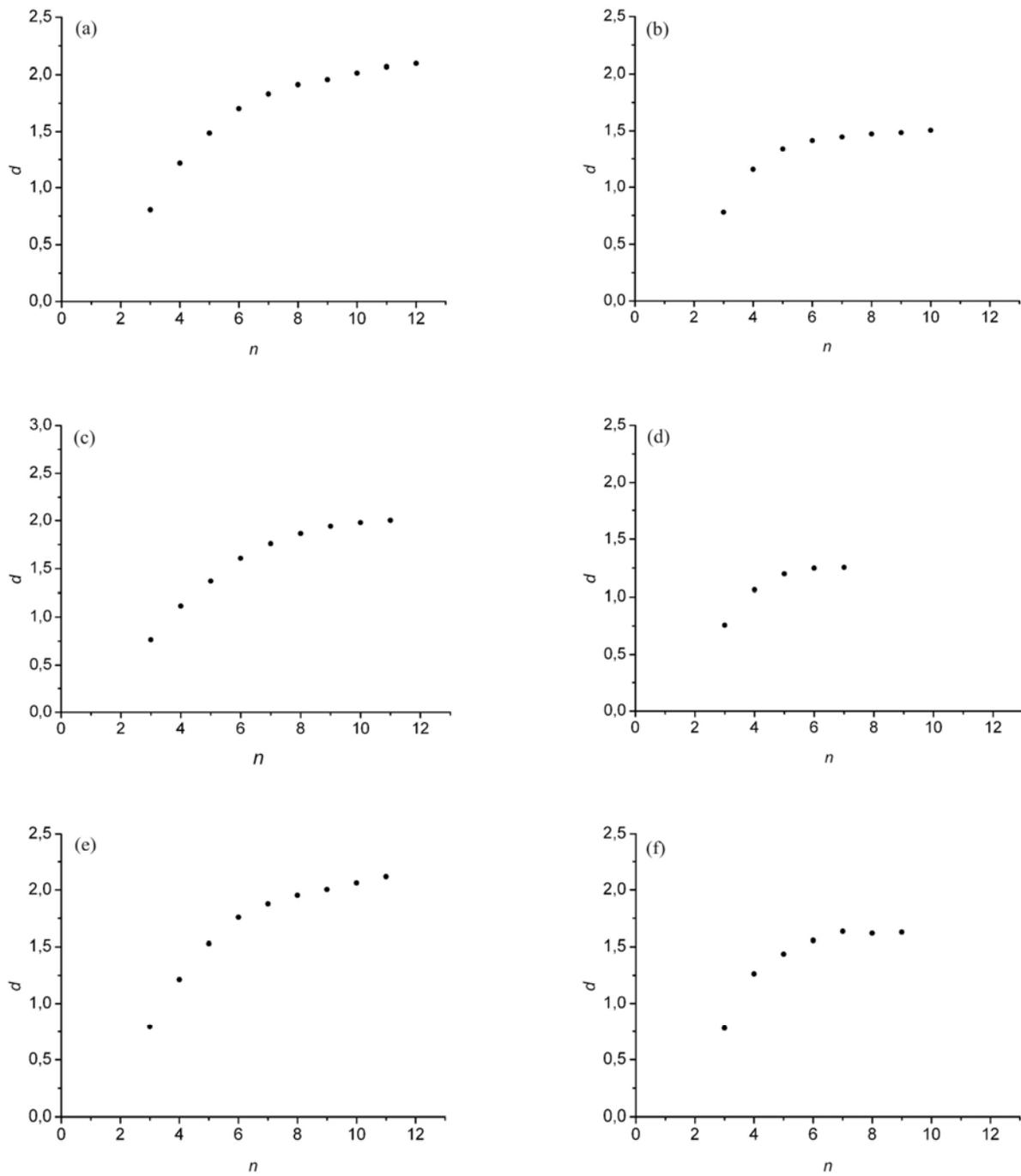


Figura 17 – Comportamento da dimensão embutida, d , para a temperatura, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

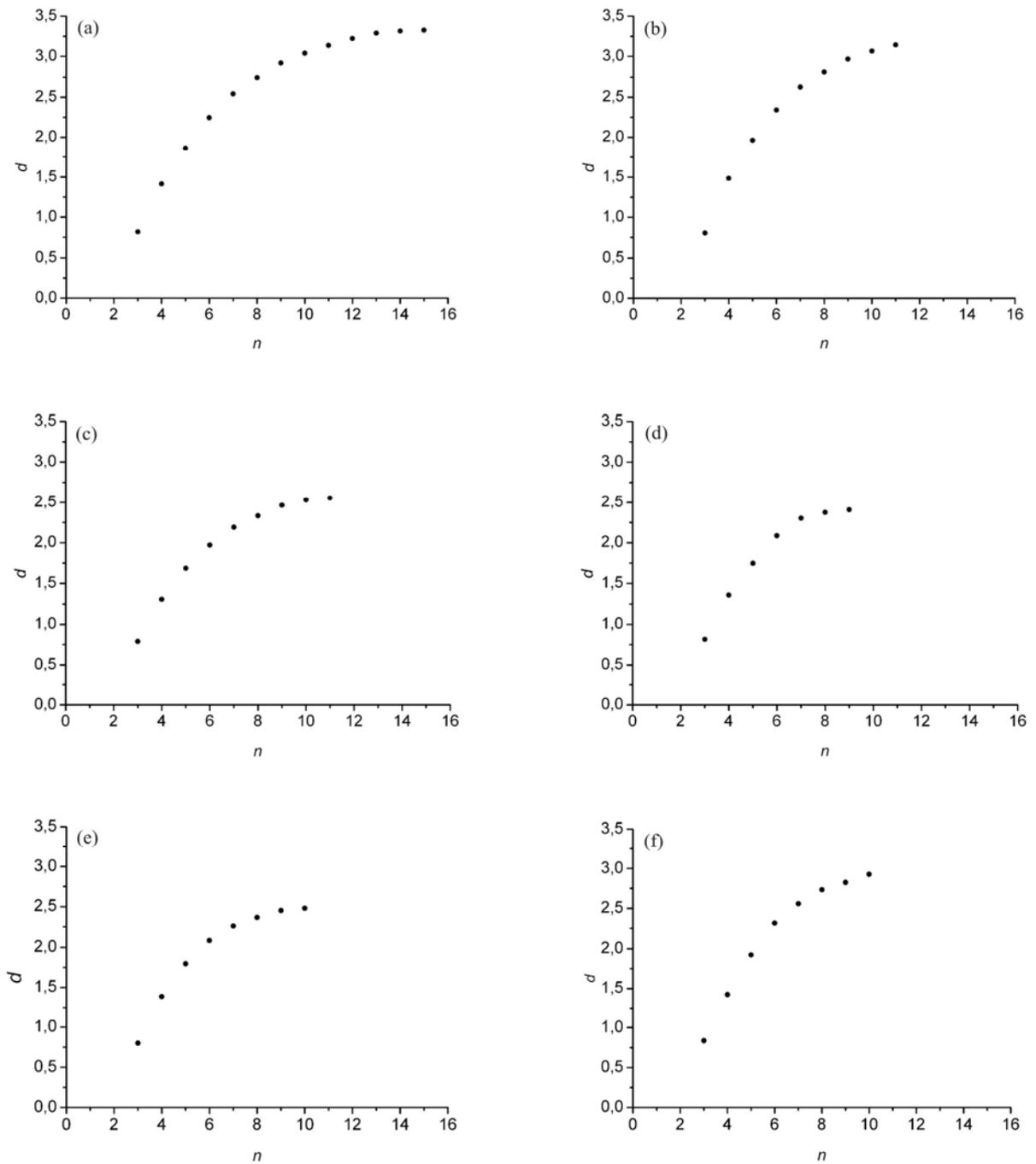


Figura 18 – Comportamento da dimensão embutida, d , para a velocidade do vento, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) junho e julho de 2002. (c) fevereiro de 2003. (d) julho de 2005. (e) janeiro e fevereiro de 2006. (f) agosto de 2006.

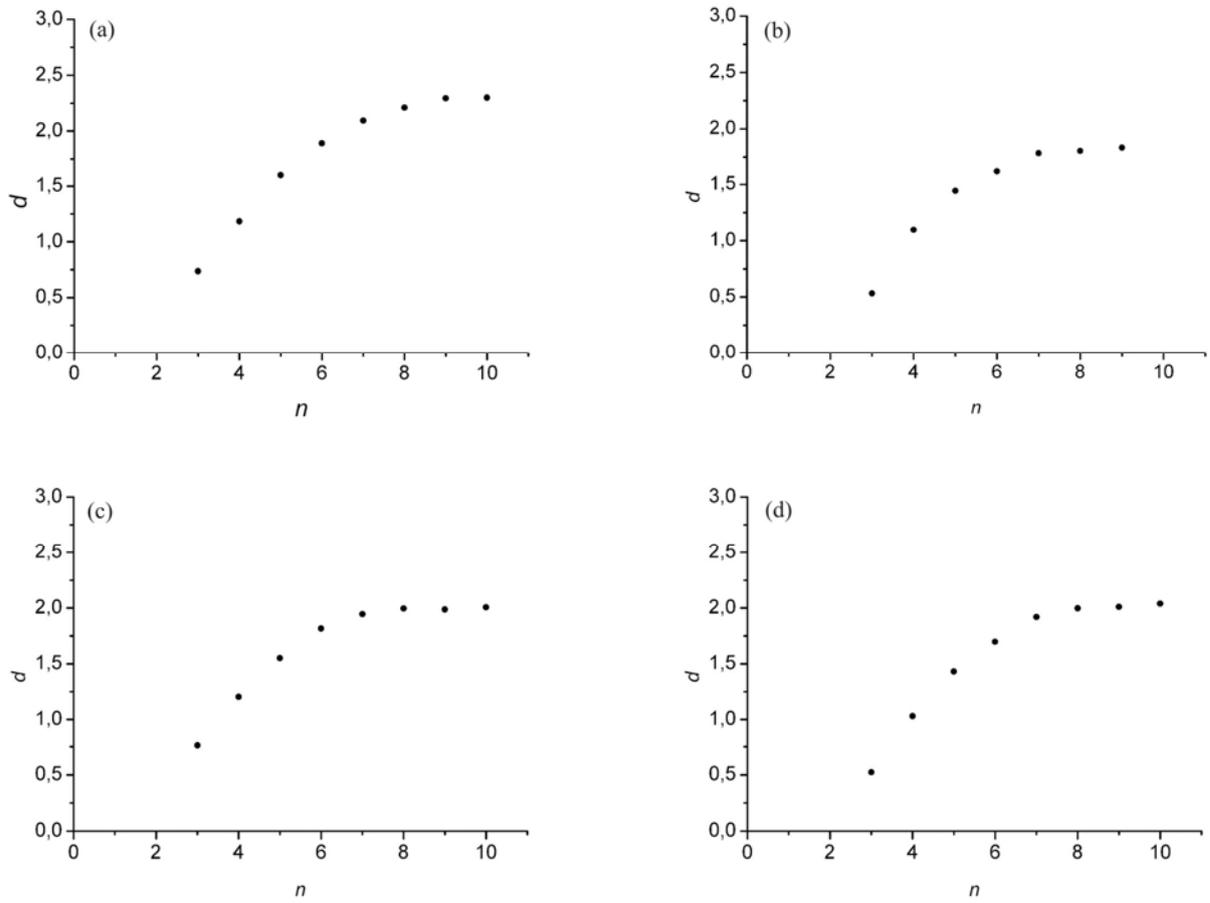


Figura 19 – Comportamento da dimensão embutida, d , para velocidade de fricção, sendo: (a) fevereiro de 2001. (b) julho de 2005. (c) janeiro e fevereiro de 2006. (d) agosto de 2006.

4.2 DIMENSIONALIDADE DOS ATRADORES

As dimensionalidades dos atratores das variáveis para os meses de fevereiro de 2001, junho e julho de 2002, fevereiro de 2003, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, e agosto de 2006, são mostrada na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores da dimensionalidade dos atratores, obtidas das Figuras 12 até 19, da concentração de CO₂, da concentração de H₂O, do fluxo de CO₂, do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível, da temperatura, da velocidade do vento e da velocidade de fricção.

variáveis	fev/01	jun-jul/02	fev/03	jul/05	jan-fev/06	ago/06
<i>CO₂</i>	1.9	1.8	2.1	1.7	2.3	1.8
<i>H₂O</i>	2.7	3.1	2.2	2.9	2.5 [‡]	2.7
<i>F_c</i>	2.1	2.9	2.7	2.1	2.2	2.1
<i>LE</i>	1.9	1.9	1.8	1.9	2.2 [‡]	1.9
<i>H</i>	2.1	2.1	1.8	2	2.1	2.2
<i>T</i>	2.1	1.5	2	1.3	2.1	1.6
<i>v</i>	3.3	3.1 [‡]	2.6	2.4	2.5	2.9 [‡]
<i>u</i> [*]	2.5			1.8	2	2

[‡] dimensão embutida (*d*) não estabilizada em um espaço de fase com 10 dimensões (*n*=10) para τ igual a 5,5 h.

As variáveis analisadas estão associadas a atratores fractais de baixa dimensionalidade (*d* entre 1 e 3), como era de se esperar para sistemas complexos

A concentração de CO₂, o fluxo de calor latente, o fluxo de calor sensível e a velocidade de fricção apresentaram um valor para a dimensionalidade, em todas as séries com defasagem de 5,5 h, próximo de 2, como podemos ver na Tabela 3. A concentração de H₂O e a velocidade do vento tiveram a dimensionalidade do atrator maior que 2. O fluxo de CO₂ apresentou um valor da dimensionalidade próximo de 2 para as séries referentes aos meses fevereiro de 2001, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, e agosto de 2006. Nas séries temporais dos meses junho e julho de 2002, e fevereiro de 2003, a dimensionalidade do atrator encontrada para fluxo de CO₂ foi maior que 2.

A dimensionalidade do atrator quando abaixo de 2, a variável apresenta comportamento periódico comportado. Quando 2, a variável esta em regime quase-periódico. E acima de dois a variável apresenta características caóticas.

Porém, foi verificado que a dimensionalidade do atrator diminui, até possivelmente estabilizar-se, com o aumento da defasagem temporal da série original para a variável fluxo de carbono (*F_c*) nos meses analisados, visto na Figura 20.

Aparentemente as variáveis ligadas mais a atmosfera, como velocidade do vento e

concentração de H₂O, apresentam dimensionalidades dos seus atratores maiores que as variáveis mais relacionadas com a vegetação, como temperatura, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível.

Tabela 3 – classificação das variáveis em: periódicas, quase-periódicas e caóticas.

séries	Fev/02			jun-jul/02			fev/03			jul/05			jan-fev/06			ago/06		
	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$	$d < 2$	$d \approx 2$	$d > 2$
CO ₂	✓				✓			✓			✓			✓				✓
H ₂ O			✓			✓				✓			✓		✓			✓
F _c	✓					✓		✓		✓			✓					✓
LE	✓				✓			✓		✓			✓					✓
H	✓				✓			✓		✓			✓					✓
T	✓			✓				✓		✓			✓			✓		
v			✓			✓			✓			✓			✓			✓
u*		✓									✓			✓				✓

A aproximação para o $d = 2$ foi feita considerando valores de d que estivessem entre 1,75 e 2,25.

A Figura 20 sugere que as dimensionalidades dos atratores podem estar superestimadas, pois a dimensionalidade do atrator de F_c tende a uma estabilidade para defasagem temporal maiores que as usadas no trabalho (5,5 h). Assim, para as variáveis que tem dimensionalidade do atrator próxima de 2, é de se esperar que tenham dimensionalidade menor que 2 e apresentem comportamento mais previsível que o esperado.

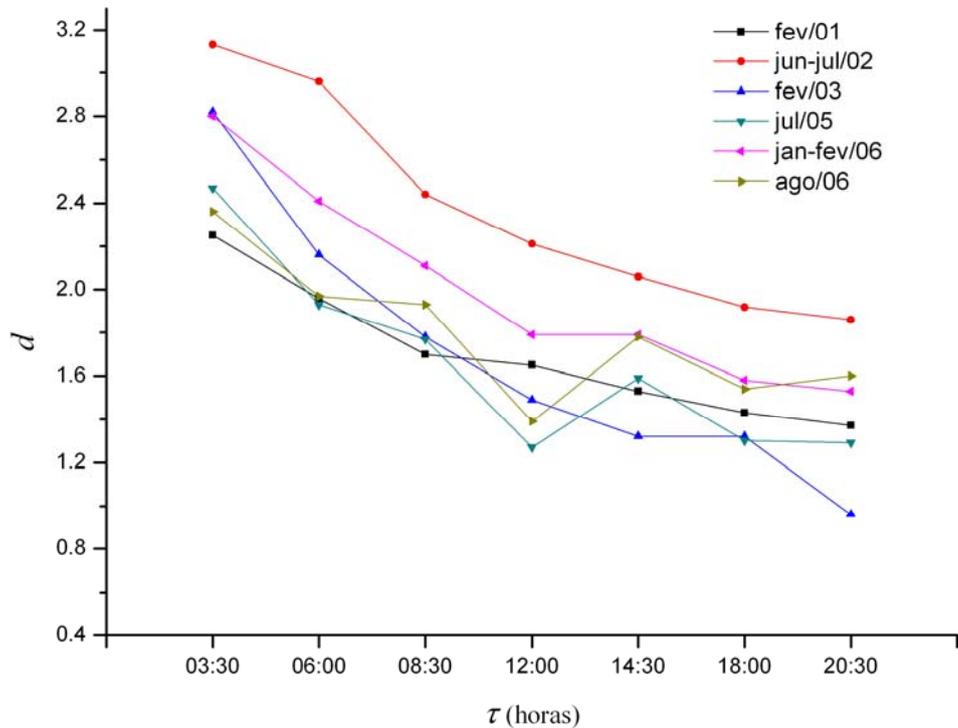


Figura 20 – Comportamento da dimensionalidade dos atratores de fluxo de CO_2 a defasagem temporal (τ) para os meses de fevereiro de 2001, junho e julho de 2002, fevereiro de 2003, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, e agosto de 2006.

4.3 DIMENSIONALIDADE MÍNIMA (GRAUS DE LIBERDADE)

O número mínimo de variáveis necessário para entendimento de uma variável específica, ou graus de liberdade, é dado na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores da dimensionalidade mínima, obtidas das Figuras 12 até 19, da concentração de CO_2 , da concentração de H_2O , do fluxo de CO_2 , do fluxo de calor latente, do fluxo de calor sensível, da temperatura, da velocidade do vento e da velocidade de fricção.

variáveis	fev/01	jun-jul/02	fev/03	jul/05	jan-fev/06	ago/06
CO_2	11	9	9	11	10 [‡]	7
H_2O	10	9	10	9	>10	9 [‡]
F_c	10	10	12	10	7	7
LE	8	8	7	7	>10	7
H	11	8 [‡]	8	9	10	7
T	9 [‡]	7	9	6	>10	7
v	13	>10	10	9	9	>10
u^*	11			7	8	8

[‡] o número mínimo de variáveis (n) não estabilizado em um espaço de fase com 10 dimensões.

As variáveis fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, temperatura e a velocidade de fricção apresentaram as menores dimensionalidade mínima. Já a concentração de H_2O e a velocidade do vento apresentaram uma maior quantidade de variáveis para serem descrita por completo.

4.4 O ATRATOR DA TEMPERATURA

Um característica da temperatura referente a sua reconstrução pela análise de séries temporais é que ela apresenta as menores dimensionalidades do atrator, principalmente em períodos de estação seca, tendo assim um atrator ocupando um volume menor no espaço de fase e uma maior previsibilidade ou compreensão.

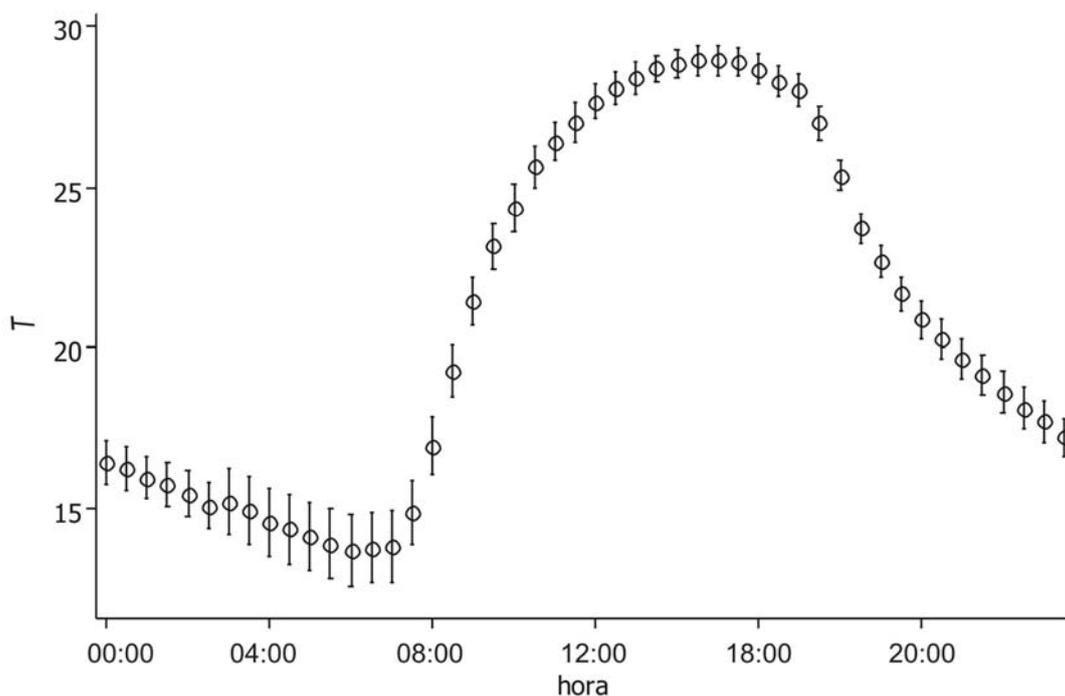


Figura 21 – Dia médio do período de junho e julho de 2002 para temperatura.

A temperatura para junho e julho de 2002, visto na Figura 21 em termo de dias médios, apresenta uma preferência pelo estado apresentado na Figura 22, que é o atrator desta variável nesse período para uma defasagem temporal de 6:00 h.

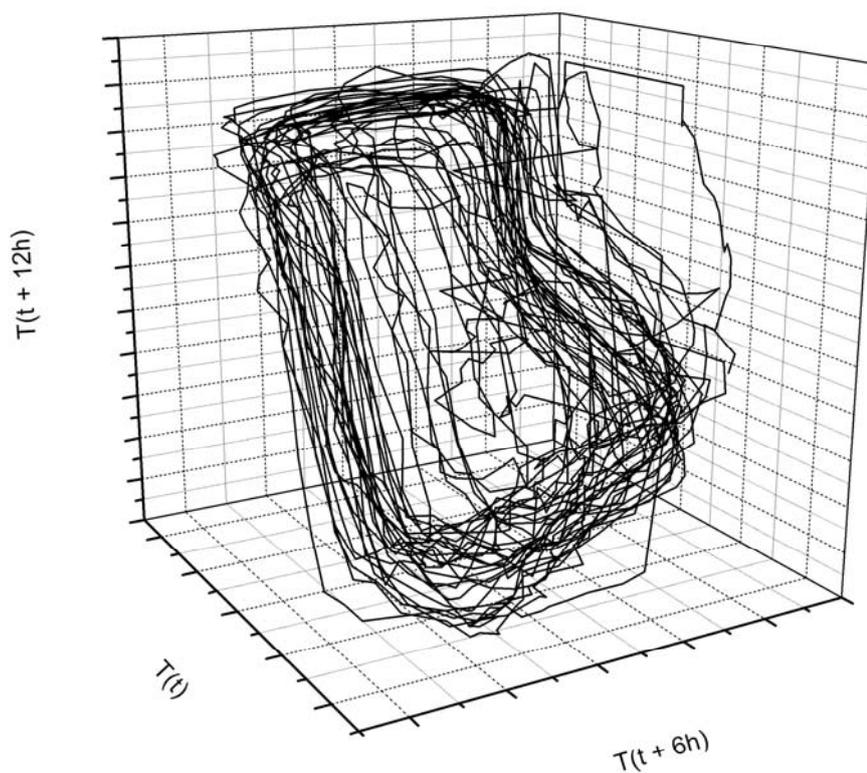


Figura 22 - Atrator da temperatura.

O gráfico das correlações com as defasagens temporais (τ) para temperatura apresenta característica de uma função cossenóide, como mostra a Figura 23. Sendo assim, na Figura 23 percebemos que a escolha da menor correlação implica que em uma segunda defasagem, a série original e a série defasada terão uma alta correlação, o que contradiz a suposição da escolha da menor correlação entre a série temporal original e a serie defasada sugerida no trabalho de Prigogine & Nicolis (1998).

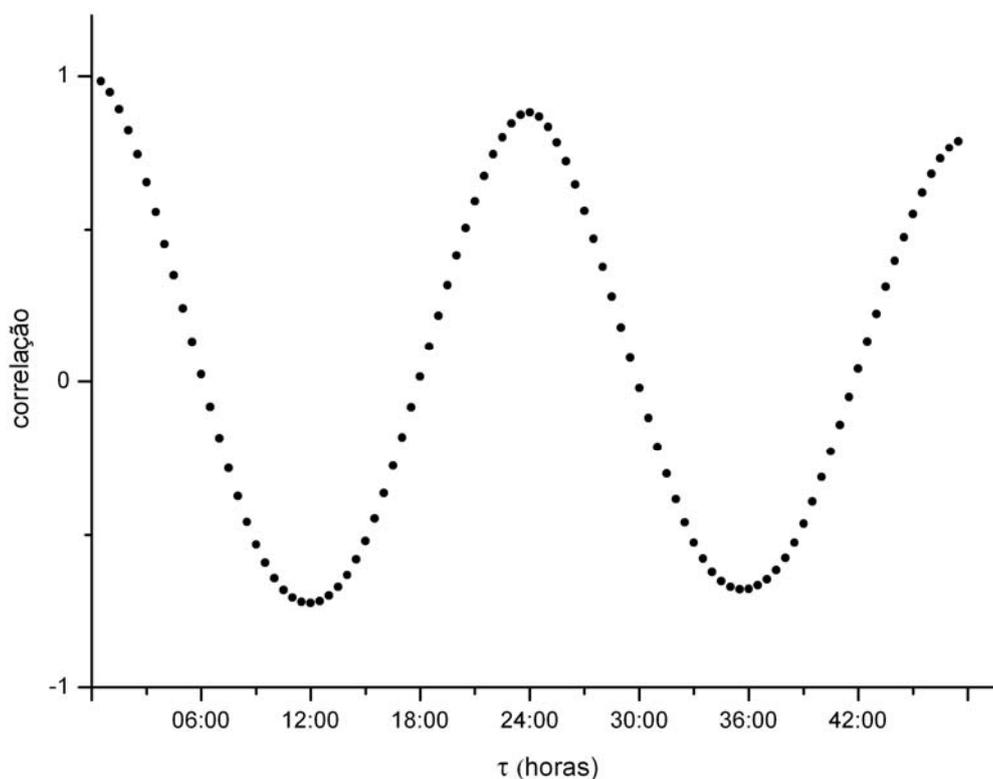


Figura 23 – Comportamento da correlação entre a série temporal do período de julho e julho de 2002 para temperatura e a mesma série defasada em τ .

4.5 SAZONALIDADE COM RELAÇÃO À DIMENSIONALIDADE DOS ATRADORES

Entre todas as variáveis analisadas, nas seis séries temporais, as únicas que apresentaram uma diferença sistemática, com relação à dimensionalidade, entre estação seca e chuvosa, foram a temperatura, a concentração de CO_2 e a concentração de H_2O no ar. As restantes, fluxo de CO_2 , fluxo de calor latente e de calor sensível, velocidade do vento e velocidade de fricção, não apresentaram esta diferença.

A Figura 24 mostra o comportamento sistemático da dimensionalidade dos atradores (*d*) da temperatura, da concentração de CO_2 e da concentração de H_2O em relação à sazonalidade.

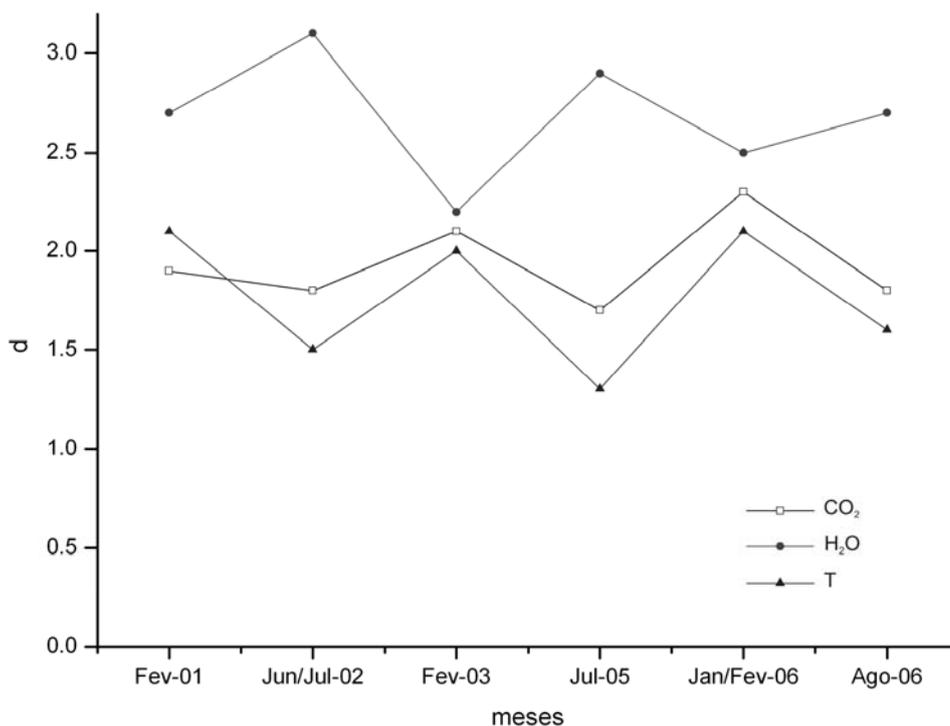


Figura 24 – Tendência sazonal da dimensionalidade dos atratores da concentração de CO₂, concentração de H₂O e temperatura.

Tanto a dimensionalidade do atrator da concentração de CO₂ quanto e da temperatura apresentam valores maiores em períodos de estação chuvosa (fevereiro de 2001, fevereiro de 2003, janeiro e fevereiro de 2006) do que em períodos correspondentes à estação seca (junho e julho 2002, julho de 2005 e agosto de 2006).

A dimensionalidade do atrator da concentração de H₂O tem padrão oposto ao da concentração de CO₂ e temperatura, apresentando nos períodos referentes à estação chuvosa valores menores que os do período de estação seca.

Os valores das variáveis concentração de CO₂, concentração H₂O e temperatura apresentam um comportamento peculiar, que é possível ver ao fazer um gráfico cujos eixos são essas variáveis. Isto sugere uma forte ligação dessas três grandezas no ecossistema, e mais, as dimensionalidades dos atratores delas estão relacionadas entre si.

Uma justificativa da temperatura (T) ter dimensionalidade menor no período seco é o fato dos dias terem comportamento semelhante neste período.

A concentração de CO₂ apresentou o mesmo comportamento devido à baixa taxa de decomposição e da dinâmica do processo fotossintético para o período seco.

O grau de complexidade da concentração de H_2O é maior no período seco, isto talvez se deva a poucas chuvas e frentes frias, que alteram bruscamente a concentração de água no ar. Já na estação chuvosa, as chuvas são constantes e a concentração de H_2O fica mais estável.

O fato de podermos verificar uma dependência sazonal implica, pelos valores de d , que o método tem uma precisão boa para este fim, assim, a precisão deve ser menor que 0,5, que foi a menor distinção entre duas causas físicas, período chuvoso e seco.

4.6 SAZONALIDADE COM RELAÇÃO AOS GRAUS DE LIBERDADE

A temperatura e a concentração de H_2O foram as únicas variáveis que apresentam um padrão de distinção entre estação seca e chuvosa em termos de graus de liberdade, como mostra a Figura 25. Nas séries de período chuvoso o número mínimo de variáveis para explicar o sistema é maior que em séries de período seco tanto para temperatura quanto para a concentração de H_2O .

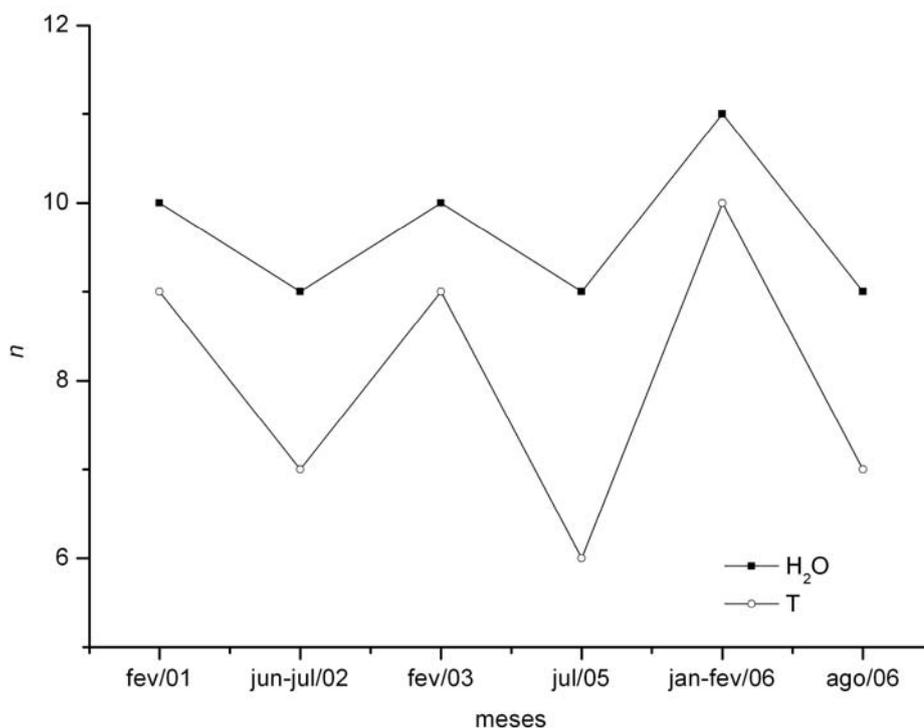


Figura 25 – Tendência sazonal da dimensionalidade mínima para a concentração H_2O e temperatura.

A concentração de H_2O apesar de ter comportamento com maior nível de dificuldade de entendimento (com respeito à dimensionalidade do atrator, d) para estação chuvosa do que para a estação seca, porém ela apresentou menores quantidades de variáveis para ser explicada (dimensionalidade mínima, n) no período chuvoso.

5 CONCLUSÕES

Para todas as séries temporais utilizando defasagem temporal de 5,5h, a dimensionalidade do atrator da concentração de CO₂, fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente foi próximo de 2. A dimensionalidade do atrator de concentração de H₂O e a velocidade do vento tiveram valores maiores que dois. O fluxo de CO₂ apresentou um valor da dimensionalidade próximo de 2 para as séries referentes aos meses fevereiro de 2001, julho de 2005, janeiro e fevereiro de 2006, e agosto de 2006. Nas séries temporais dos meses junho e julho de 2002, e fevereiro de 2003, a dimensionalidade do atrator encontrada para fluxo de CO₂ foi maior que 2. Porém, é possível que as dimensionalidades de todos atratores estejam superestimadas.

É válido lembrar que 2 é um limite para dimensionalidade do atrator (d). Dimensionalidade do atrator entre 1 e 2 corresponde a comportamento cíclico definido; para valores da dimensionalidade d iguais a 2 o comportamento é cíclico porém com sua amplitude e frequência incertas. Acima de 2 o atrator é caótico, e a variável é influenciada fortemente por perturbações.

Aparentemente as variáveis ligadas mais a atmosfera, como velocidade do vento e concentração de H₂O, apresentam dimensionalidades dos seus atratores maiores que as variáveis mais relacionadas com a vegetação, como temperatura, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível. Talvez isto seja justificado por variáveis atmosférica não serem locais, conseqüentemente sofrem influências de outras localidades.

O número mínimo de variáveis necessário para entendimento de uma variável específica variou (em números inteiros) para concentração de CO₂ entre 7 e 11; para concentração de H₂O entre 9 e um inteiro pouco maior que 10; para F_c de 7 a 12; para LE de 7

a um inteiro pouco maior que 10; para H de 7 a 11; para T de 7 a um inteiro pouco maior que 10; para v entre 9 e 13; e para u^* de 7 a 11.

Alguns resultados do trabalho podem servir de subsídio para a construção de modelos. Por exemplo, a Figura 26 indica que a modelagem da temperatura em Sinop exigiria a consideração de 8 variáveis, em quanto que a concentração de vapor d'água, 10 variáveis.

A dimensionalidade mínima de uma variável, é o número mínimo necessário de outras variáveis para descrever o seu atrator.

As únicas variáveis que apresentaram uma diferença sistemática, com relação à dimensionalidade, entre estação seca e chuvosa, foram a temperatura, a concentração de CO_2 e a concentração de H_2O no ar. Para temperatura e a concentração de CO_2 , ao contrario da concentração de H_2O , a dimensionalidade do atrator (d) foi maior no período chuvoso. Isto possivelmente deve-se ao fato dos dias serem semelhantes com relação à temperatura no período seco e ao fato da concentração de CO_2 ter menor caráter dinâmico devido a queda na decomposição da serrapilheira e no processo fotossintético. Já a concentração de H_2O , na estação chuvosa, está quase sempre em concentrações altas a ponto de saturar-se, devido as constantes chuvas do período.

A temperatura e a concentração de H_2O foram as únicas variáveis que apresentam um padrão de distinção entre estação seca e chuvosa em termos de graus de liberdade.

A concentração de H_2O apresentou maiores dimensionalidades dos atratores (d) para os períodos secos, e, menores dimensionalidades mínimas (n) para as respectivas séries do mesmo período. Assim a concentração de H_2O necessita de menor número de variáveis para ser descrita por completa, porém apresenta ao mesmo tempo, um maior nível de dificuldade de ser compreendida.

6 BIBLIOGRAFIA

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

BALDOCCHI, D. D.; HYCKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, Vol. 69(5), p. 1331-1340, 1988.

BAR-YAM, Y. **Dynamics of Complex Systems**. Reading, MA: 1ª ed. Adison-Wesley, 837p. 1997.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An Introduction to Environmental Biophysics**. 2º ed. Nova York: Springer, 1998. 281p.

COCHRAN, G. C. & COX, G. M. **Experimental designs**: Canadá, 2ª ed. 1957. p. 58-77 e 244-276. 613p.

DEVANEY, R. L. **An Introduction to Chaotic Dynamics Systems**. Boston: 2ª ed. Addison Wesley, 336p. 1989.

ECKMANN, J. P.; RUELLE, D. Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors. USA, **Review of Modern Physics**, Vol. 57, n. 3, p. 617-656. 1985.

EISBERG, R. e R. RESNICK: **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Campus Ltda, 1986.

FALCONER, K., **Fractal Geometry**. Mathematical foundations e applications. West Sussex, UK: Jonh Wiley & Sons Ltd. 288p. 1990.

FRISCH, U. **Turbulence**. The Legacy of A. N. Kolmogorov. New York: 1ª ed. Cambridge Press, 296p. 1995.

FERRI, M. G. **Fisiologia vegetal**. São Paulo. p. 117-142. 362p. 1995.

GALLON, M. M. P. **Um estudo sobre a dinâmica de sistemas complexos a partir de séries temporais de dados microclimatológicos para uma floresta de Transição no**

Noroeste de Mato Grosso. Cuiabá, 2005. 115p. Dissertação (Mestrado) - Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso.

GOLDSTEIN, H.; POOLE, C.; SAFKO, J. **Classical Mechanics.** San Francisco: 3^a ed. Addison Wesley, p. 484-525, 2002.

GOULDEN, M. L.; MUNGER J. W.; FAN, S. M; DAUBE, B. C.; WOFYSY S. C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. **Global Change Biology**, Vol. 2: p.168-182. 1996.

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

HILBORN, R. C. **Chaos and Nonlinear Dynamics.** An Introduction for Scientists and Engineers. New York: 2^a ed. Oxford University Press, 650p. 1994

JONES, H. G. **Plants and Microclimate.** A quantitative approach to enviromental plant physiology. 2^a ed. New York: Cambridge University Press, 1992, 413p.

LESLIE, D. C. **Developments in the Theory of Turbulence.** London: 1^a ed. Clarendon Press, 368p. 1973.

LIMA JR., E.de C.; ALVARENGA; A. A. de; CASTRO, E. M. de; VIERA, C. V.; BARBOSA, J. P. R. A. D. Physioanatomy traits of leaves in young plants of *Cupania vernalis* camb. subjected to different shading levels. **Rev. Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, 2006.

MACHADO, K. D. **Equações diferenciais aplicadas à física.** Ponta Grossa: 2.ed. UEPG, p. 183-208. 660p. 2000.

MIRANDA, E. J; PRIANTE FILHO, N.; PRIANTE FILHO, P. C.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; SULI, G. I.; FRITZEN, C. L.; NOGUEIRA, J. de S.;VOURLITIS, G. L. Maximum leaf photosynthetic lights response for three species in a transitional tropical Forest in Southern Amozonia. **Revista Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Vol. 8, nº 1, p. 164-167. 2004.

MONCRIEFF, J. B.;MAHLI, Y.; LEUNING, R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide and water. **Global Change Biology**. Vol. 2, p. 231-240. 1996.

MONTEITH, J. L. **Principles of Environmental Physics**. London: 1ª ed. Edward Arnold, 241p. 1973.

NOBRE, C. A. Modelos e cenários para a Amazônia: o papel da ciência. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias Estratégicas**, nº 12. p. 239-258. 2001.

NICOLIS, G. e PRIGOGINE, I. *Exploring Complexity – An Introduction*. 5ª edição. New York, U.S.A.: W. H. Freeman and Company, 1998. 312p.

PARCKARD N. H.; CRUTCHFIELD, J. P.; FARMER, J. D.; SHAW, R. S. Geometry from a Time Series. **The American Physical Society**. USA, Vol. 45, n. 10, p.712-716. 1980.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia. Fundamentos e Aplicações Práticas**. 1ª ed. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478p.

OTT, E. **Chaos in dynamics system**. New York: 1ª ed. Cambridge Press, 385p. 1993.

PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S., NOGUEIRA, J. S. de; CAMPELO JR, J. H., NUNES, P. C.; SANCHES, L.; COUTO, E. G.; HOEGER, W.; RAITER, F.; TRIENWEILER, J. L.; MIRANDA, E. J.; PRIANTE, P. C.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S.; FRITZEN, C. L.; LACERDA, M.; SULI, G. S.; SHIRAIWA, S.; 113 SILVEIRA, M.; VOURLITIS, G. L. Comparison of the mass and energy Exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon basin during the wet-dry season transition. **Global Change Biology**, Urbana – IL – USA, Vol. 10, p. 863-876. 2004.

PRIGOGINE, I. **From Being to Becoming**. USA: 1ª ed. W. H. Freeman, 210p. 1980.

PRIGOGINE, I.; NICOLAS, G. **Self-Organization in Non-Equilibrium Systems**. USA: 1ª ed. John Wiley & Sons, 490p. 1997.

SALISBURY. F. B. & ROSS, C. W. **Fisiología Vegetal**. México: Ed. Iberoamétrica, 1994.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, SPYROS N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**. New york, USA: John Wiley & Sons, Inc. , 1326 p.1998.

SOUSA, A. De; MORAES, M, G;RIBEIRO, R, de C. L. F. Gramíneas do cerrado: Carboidratos não – estruturados e aspectos ecofisiológicos. **Revista Botânica brasileira**. v.19, p.81-90, 2005.

STEVEN, M. D; BISCOE, P. V.; JAGGARD, K.W.; PARANTU. J. Foliage cover and radiation interception. **Field Crops Reaserch**. 13, p. 75-87, 1986. 249-292. 759p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: 3^a ed. Artmed, 2004. p. 96-135. 719p.

VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**, Vol. 5, p. 99-115. 1990.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S. de; CASEIRO, F.; CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical Forest (cerradão). **Functional Ecology**. V.15, p. 388-395. 2001.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M.; NOGUEIRA, J. S. de; CASEIRO, F.; CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in evapotranspiration of a transitional tropical Forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, Vol. 38, n° 6, p. 30-1 - 30-11. 2002.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. M. S.; NOGUEIRA, J. de S.; CASEIRO, F. T.; e CAMPELO JR, J. H. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian tropical transitional forest (cerradão). **Functional Ecology** Vol. 15, p. 388-395. 2001.

VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. de S., PRIANTE FILHO, N.; HOEGER, W.; RAITER, F.; BIUDES, M. S.; ARRUDA, J. C.; CAPISTRANO, V. B.; de FARIA, J. L. B.; LOBO, F. de A. The sensitivity of diel CO₂ and H₂O vapor exchange of a tropical transitional forest to seasonal variation in meteorology and water availability. **Earth Interactions**, Vol. 9, n. 27. 2005.

WILLIAMS; G. P. **Chaos Theory Tamed**. Washington: 1^a ed. Joseph Henry Press, 406p. 1997.