
VARIABILIDADE SAZONAL E INTERANUAL DA DIMENSÃO FRACTAL DE SÉRIES DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DA AMAZÔNIA E PANTANAL

GEISON JADER MELLO, IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO, SÉRGIO ROBERTO DE PAULO, RAPHAEL DE SOUZA ROSA GOMES, NADJA GOMES MACHADO, JOSÉ DE SOUZA NOGUEIRA e MARCELO SACARDI BIUDES

RESUMO

A elevação da temperatura média do planeta, mudança no regime de chuva, ocorrência de secas e enchentes mais rigorosas, assim como o desmatamento acelerado destacam a necessidade da descrição e entendimento dos microclimas ecossistêmicos. A análise de séries temporais na abordagem da teoria dos sistemas dinâmicos permite caracterizar o comportamento não linear dos sistemas florestais. O objetivo deste trabalho foi analisar dados provenientes de torres micro-meteorológicas medidos acima do dossel da floresta em sítios experimentais na Amazônia Legal e no Pantanal Brasileiro procurando por atratores climáticos de baixa dimensão frac-

tal nas variáveis temperatura (T) e umidade relativa (RH) no período 2005-2010. A sensível variação anual e interanual das estimativas da dimensão fractal (dimensão de correlação) D_2 ($D_{2(T)Amaz} = 1,73 \pm 0,29$; $D_{2(RH)Amaz} = 1,89 \pm 0,30$; $D_{2(T)Pant} = 2,08 \pm 0,26$; $D_{2(RH)Pant} = 2,23 \pm 0,18$) e da dimensão de imersão m ($m_{(T)Amaz} = 8 \pm 2$; $m_{(RH)Amaz} = 9 \pm 2$; $m_{(T)Pant} = 9 \pm 1$; $m_{(RH)Pant} = 10 \pm 1$) sugerem fortemente a existência de atratores estranhos de baixa dimensão governando a dinâmica desses biomas. O valor do expoente D_2 dos atratores oscilou em fase sazonalmente e apresentou sensibilidade às queimadas florestais.



Amazônia abriga um terço das florestas tropicais do planeta e concentra 50% da diversidade biológica mundial com imenso patrimônio genético (Batistella *et al.*, 2008). O Pantanal abriga biodiversidade desproporcionalmente alta e influencia substancialmente o ciclo do carbono e outros gases de

efeito estufa, segundo o *Millennium Ecosystem Assessment* (2005). Juntos, esses ecossistemas tropicais desempenham papéis importantes na estabilidade do clima regional e global (Cook e Vizy, 2008). Entretanto, as evidências de alteração do meio ambiente pela elevação da temperatura média do planeta entre 1,8 e 4°C até o ano de 2100; a mudança no re-

gime de chuvas e ocorrência de secas e enchentes mais rigorosas (IPCC, 2007; Brasil, 2011) e o desmatamento acelerado (Achard *et al.*, 2002; Margulis, 2004; Shaeffer e Rodrigues, 2005; Costa e Pires, 2010) destacam a urgência da descrição e entendimento da dimensão dos impactos ambientais nesses ecossistemas (Gomes e Varriale, 2004).

PALAVRAS CHAVE / Amazônia / Atratores Estranhos / Dimensão de Correlação / Espaço de Fase / Fractais / Pantanal / Queimada Florestal /

Recebido: 20/06/2012. Modificado: 15/04/2013. Aceito: 29/11/2013.

Geison Jader Mello. Doutor em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Brasil. Professor, Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), Brasil. Endereço: Rodovia BR-364, KM-329, s/n. São Vicente da Serra - Santo Antônio do Leverger, MT, CEP 78.106-000, Brasil. e-mail: geison.mello@svc.ifmt.edu.br

Iramaia Jorge Cabral de Paulo. Doutora em Ensino de Ciências, Universidad de Burgos, Espanha. Professora, UFMT, Brasil. e-mail: ira@ufmt.br

Sérgio Roberto de Paulo. Doutor em Física, Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Professor, UFMT, Brasil. e-mail: sergio@ufmt.br

Raphael de Souza Rosa Gomes. Mestre em Física Ambiental, UFMT, Brasil. e-mail: thesivis@gmail.com

Nadja Gomes Machado. Doutora em Física Ambiental, UFMT, Brasil. Professora, IFMT, Brasil. e-mail: nadja.machado@blv.ifmt.edu.br

José de Souza Nogueira. Doutor em Ciências, Universidade de São Paulo, Brasil. Professor, UFMT, Brasil. e-mail: nogueira@ufmt.br

Marcelo Sacardi Biudes. Doutor em Agricultura Tropical, UFMT, Brasil. Professor, UFMT, Brasil. e-mail: marcelo@fisica.ufmt.br

Estes aspectos demonstram a fragilidade e complexidade do funcionamento desses ecossistemas que ainda não são totalmente claros. Tal fato se deve parcialmente, à falta de dados históricos medidos *in situ*, e ao fato de que o problema é de natureza complexa, necessitando de uma abordagem interdisciplinar com o auxílio de ferramentas matemáticas computacionais. Destaca-se a importância da aplicação da teoria da complexidade (Nicolis e Prigogine, 1989) na análise e modelagem de dados experimentais provenientes de florestas, dado ao número, a variedade e o acoplamento de seus subsistemas. A interação entre a superfície da vegetação e a atmosfera é característica de sistemas dinâmicos dissipativos, distantes do equilíbrio termodinâmico e auto-organizativos, com troca de matéria, energia e momentum. Dessa forma, tende ao maior acúmulo de energia e prefere caminhos de configurações que privilegiem o maior acúmulo de biomassa possível (Jorgensen e Fath, 2004).

A análise de séries temporais obtidas em experimentos usando a teoria da complexidade permite identificar e descrever traços importantes da dinâmica não linear de sistemas florestais, tais como a dimensão fractal dos atratores e o número de parâmetros necessários para controlar a evolução temporal no espaço de fase e a existência de ciclos limites de diversas periodicidades (Gomes e Varriale, 2001). Microclimas ecossistêmicos comportam-se como estruturas dissipativas, ou seja, tendem a encontrar condições de estabilidade frente a perturbações externas; e o nível de complexidade pode ser classificado por meio da estrutura geométrica das órbitas no espaço de fase das variáveis (Fiedler-Ferrara e Prado, 1995), que possivelmente apresentam atratores estranhos com dimensão fractal (Mandelbrot, 1977).

Pesquisas recentes têm abordado a natureza complexa de séries temporais, seja com dados de alta frequência no estudo balanços de matéria e energia, seja com séries históricas no estudo das variações sazonais e interanuais (Galon *et al.*, 2006; Campanharo *et al.*, 2008; Millán *et al.*, 2009), contribuindo para o entendimento e modelagem da interação entre a superfície da vegetação e a atmosfera. A teoria dos sistemas dinâmicos (Eckmann e Ruelle, 1985; Nicolis e Prigogine, 1989; Lorenz, 1991), com pesquisas aplicadas à séries temporais destaca a possível existência de atrato-

res climáticos de baixa dimensão caótica e indicam o número mínimo de variáveis presentes na evolução do sistema (Nicolis e Nicolis, 1984; Fraedrich, 1986; Povedo-Jaramillo e Puente, 1993; Gallego *et al.*, 2001; Xin *et al.*, 2001; Campanharo *et al.*, 2008). As séries temporais medidas em florestas podem exibir componentes com características de dinâmica complexa possíveis de serem descritas por um sistema determinístico de baixa dimensão.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades geométricas dos atratores reconstruídos no espaço de fase a partir de séries temporais experimentais de temperatura do ar (T) e da umidade relativa do ar (UR) medidas em uma floresta de transição Amazônia-Cerrado e em uma área monodominante de Cambará no Pantanal.

Material e Métodos

Áreas de estudo e instrumentação utilizada

Os dados utilizados são provenientes de duas áreas experimentais de floresta tropical que apresentam características sazonais bem definidas na Região Centro-Oeste do Brasil. A primeira área experimental localiza-se na Amazônia Legal, a ~50km noroeste de Sinop, MT, onde estava instalada uma torre micrometeorológica de 40m de altura (11° 24' 75" S; 55° 19' 50" O; altitude 420m). Esta área é constituída por uma floresta tropical de transição, com um dossel contínuo, composto de árvores de 28-30m de altura. O solo possui alta porosidade e alta capacidade de dreno das águas pluviais. A região de Sinop possui média anual da temperatura do ar de 24,4°C, da umidade relativa média do ar 80,7% e precipitação média anual 2000mm, com quatro meses de estação seca de junho a setembro (INMET, 2009).

A segunda área experimental é localizada na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) SESC - Pantanal, município de Barão de Melgaço, MT, distante 160km de Cuiabá, MT, onde está instalada uma

torre micrometeorológica de 32m de altura (16° 39' 50" S; 56° 47' 50" O; altitude 120m). Esta área apresenta uma floresta monodominante de Cambará (*Vochysia divergens*), conhecido localmente como cambarazal, com altura do dossel variando de 28-30m (Arieira e Nunes da Cunha, 2006). O solo foi classificado como Gleissolo Háplico Ta distrófico. A média anual de temperatura do ar é de 25,6°C, a umidade relativa média do ar 73,1%, e precipitação média anual 1342mm, com precipitação <50mm no período seco de junho a setembro (INMET, 2009).

As medidas de temperatura do ar (T) e umidade relativa do ar (UR) foram realizadas por meio de termohigrômetros de baixa resolução amostral (Vaisala HMP 45C, Helsinki, Finlândia) instalados a 10m de altura acima do dossel das duas florestas (~40m de altura do solo). Nas duas áreas os dados foram coletados a cada 2s e armazenados por dataloggers (Campbell Scientific CR 10X, Ogden, Utah, EEUU) com média de 15min no Pantanal e de 30min na Amazônia. Na análise dos dados levou-se em consideração a sazonalidade (Tabela I), sendo período seco representado neste trabalho pelos meses julho até setembro e período chuvoso pelos meses janeiro e fevereiro (Marengo *et al.*, 2001; Gan *et al.*, 2004).

TABELA I
SUBDIVISÃO DOS DADOS POR SÍTIOS E SAZONALIDADE

Ano	Sazonalidade	Sítio / Meses	
		Amazônia	Pantanal
2005	Seca	Agosto - Setembro	-
2006	Chuva	Janeiro	-
2006	Seca	Agosto	Agosto - Setembro
2007	Chuva	Fevereiro	Janeiro - Fevereiro
2007	Seca	Agosto	Agosto
2008	Chuva	Fevereiro	Fevereiro
2008	Seca	Julho - Agosto	Agosto
2009	Chuva	-	Janeiro
2009	Seca	-	Setembro
2010	Chuva	-	Janeiro
2010	Seca	-	Agosto - Setembro

Método de Análise

Baseados na teoria dos sistemas dinâmicos, os métodos de análise usados neste trabalho possibilitam estudar as propriedades geométricas de séries temporais experimentais a partir da trajetória dos estados no espaço de fase reconstruído segundo o teorema de imersão (Takens, 1981) e o algoritmo de Grassberger e Procaccia

(1983). No entanto, antes de prosseguir com o estudo se faz necessário um teste estatístico que justifique a abordagem por teoria dos sistemas dinâmicos, este teste é chamado 'surrogate' (Millán *et al.*, 2009).

Teste surrogate

Antes de iniciar as análises por métodos não lineares é necessário distinguir entre séries de dados não lineares e séries de dados aleatórios. Para tanto foi sugerido o teste *surrogate* (Theiler *et al.*, 1992; Provenzale *et al.*, 1992), que consiste em estimar a distribuição das fases da FFT (Fast Fourier Transform), que em seguida são embaralhadas uniformemente e aplicada a transformada de Fourier inversa. A série temporal obtida com este processo é aleatória, já que o *surrogate* destrói as correlações existentes na série temporal que lhe deu origem, porém ela mantém as mesmas propriedades espectrais (amplitude e fase de Fourier) e a mesma distribuição estatística que os dados originais. Se os invariantes topológicos são determinados apenas pela forma do espectro então eles não são afetados pelas fases embaralhadas. A preservação dos invariantes topológicos (como dimensão de correlação D_2) sobre as fases embaralhadas sugere fortemente que tais estimativas não indicam uma dinâmica caótica (Campanharo *et al.*, 2008).

O procedimento desse teste estatístico é o de aceitar ou rejeitar a hipótese nula. Admitindo-se a hipótese nula seja que a série temporal foi gerada por um processo estacionário estocástico gaussiano, rejeitar a hipótese nula ao nível de significância determinado ($p < 0,05$) significa que a estrutura não linear e seus invariantes topológicos ainda estão preservados no *surrogate* (Schreiber e Schmitz, 2000).

A correspondência entre a série original e a série *surrogate* é dada em termos de discrepância relativa que se aproxima de zero com o aumento do número de interações de embaralhamento (Millán *et al.*, 2009). Este teste robusto é o mais utilizado na literatura para verificar não linearidades em séries temporais experimentais (Millán *et al.*, 2009).

O algoritmo (Grassberger e Procaccia, 1983; Nicolise e Prigogine, 1989) utilizado para reconstrução da dinâmica de séries temporais de sistemas complexos tem os seguintes dois passos: 1) definição do tempo de atraso τ usando o método da informação

mutual $MI(\tau)$, e 2) cálculo da dimensão de correlação D_2 e dimensão de imersão m a partir do atrator reconstruído.

Escolha do tempo de defasagem τ por informação mútua $MI(\tau)$

Em experimentos ambientais não é possível medir todas as variáveis do sistema, de forma que a partir da medida de uma única série temporal é possível reconstruir toda a estrutura geométrica da dinâmica e exibir as características das variáveis não medidas do sistema. Takens (1981) provou que o atrator reconstruído a partir dos eixos $S_{n(x)}$, $S_{n(x+\tau)}$, $S_{n(x+2\tau)}$, $S_{n(x+(m-1)\tau)}$ sendo $\tau = \Delta t$: tempo de defasagem; e m : espaço de imersão, é topologicamente equivalente ao atrator real. A correta reconstrução do atrator depende da escolha do tempo de defasagem τ .

Fraser e Swinney (1986) propuseram o uso da informação mútua $MI(\tau)$ como uma forma de autocorrelação não linear para determinar o valor de τ adequado. Admite-se que os valores de x_n e $x_{n+\tau}$ sejam estatisticamente independentes o suficiente para serem coordenadas de um vetor com retardo, mas não demasiadamente independentes a ponto de não terem nenhuma conexão um com o outro (Gomes e Varriale, 2004). Para a reconstrução do espaço de fase utiliza-se o tempo de defasagem τ que corresponde ao primeiro mínimo obtido da $MI(\tau)$; o qual é obtido pela função

$$MI(\tau) = - \sum_{x, x+\tau} P_{x, x+\tau} \ln \frac{P_{x, x+\tau}}{P_x P_{x+\tau}} \quad (1)$$

Onde P_x : probabilidade da medida x , $P_{x+\tau}$: probabilidade da medida, e $P_{x, x+\tau}$: probabilidade da medida combinada de x e $x+\tau$, com $MI(\tau) \geq 0$ (Millán *et al.*, 2009).

A $MI(\tau)$ é uma função da probabilidade combinada de x e $x+\tau$. Se x e $x+\tau$ são iguais, então $MI(\tau)$ é máximo. Por outro lado se x e $x+\tau$ são completamente independentes, então o argumento do termo logarítmico é a unidade e $MI(\tau) = 0$. Assim, é estabelecido (Fraser e Swinney, 1986) que o valor ótimo do tempo de defasagem τ corresponde ao primeiro mínimo local (quando ele ocorrer) da função $MI(\tau)$.

Cálculo da dimensão de correlação D_2 e dimensão de imersão m

Reconstruído o atrator, calcula-se a sua dimensão fractal, ou seja, a dimensão de correlação D_2 . Sabe-se que a D_2 provê informações va-

lias quanto aos sistemas dinâmicos: se a dimensionalidade for $D_2 = 1$, tem-se uma oscilação periódica autossustentável; se $D_2 = 2$, o sistema apresenta oscilações quase periódicas de duas frequências independentes; se D_2 é um número não inteiro e > 2 (o caso de um atrator fractal), espera-se que o sistema exiba uma oscilação não-periódica devido a uma imprevisibilidade intrínseca.

A dimensão de correlação D_2 de uma série temporal S_n foi proposta por Grassberger e Procaccia (1983) com a representação do número de variáveis que governam o sistema dinâmico do qual a série é proveniente. Ou seja, a D_2 provê o valor da dimensão de imersão m do espaço de fase onde o atrator está contido. A D_2 (Grassberger e Procaccia, 1983) é dada pela relação

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln C(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (2)$$

onde $C(\varepsilon)$: função de correlação integral definida por

$$C(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|) \quad (3)$$

em que N : número de pontos do atrator ou o comprimento da série temporal, $|\cdot|$: normal euclidiana que mede a distância entre os pares de vetores na dimensão de imersão m , e $\theta(\cdot)$: função de Heavyside, definida como

$$\theta(x) = 1 \text{ se } x > 0; \text{ e } \theta(x) = 0 \text{ se } x \leq 0 \quad (4)$$

Assim, a partir da nuvem de pontos do atrator em determinado um espaço m dimensional, conta-se o número de pares $C(\varepsilon)$ com distâncias inferiores ao raio ε da hipersfera de sondagem. E deste modo, se ε for significativamente pequeno, obtêm-se a relação

$$C(\varepsilon) \sim \varepsilon^{D_2} \quad (5)$$

ou seja, a D_2 de um atrator é dada pela declinação $\log C(\varepsilon)$ por $\ln \varepsilon$ para certa distância de ε :

$$\ln C(\varepsilon) = D_2 \ln \varepsilon \quad (6)$$

Como na prática não se sabe qual o m adequado para a reconstrução do atrator, procede-se da seguinte maneira: calcula-se a integral de correlação para valores de m crescentes (de 1 até 20, por exemplo). Para cada m obtém-se então um valor de $D_2(m)$ correspondente. A declinação de

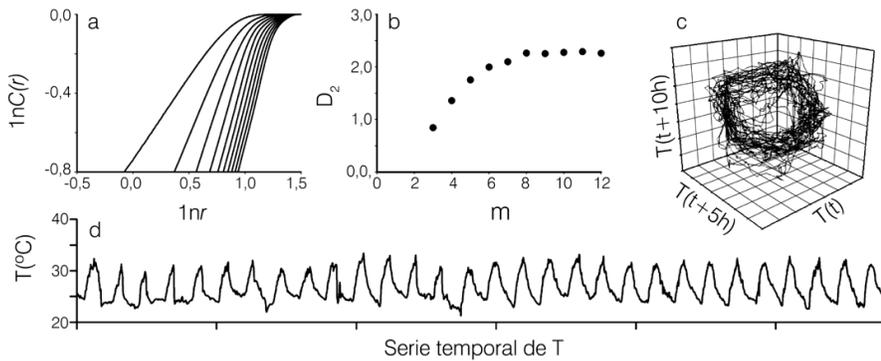


Figura 1. a: $\ln C(r)$ vs $\ln r$ para diferentes valores de dimensões do espaço de fase, b: saturação da dimensão de correlação vs dimensão de imersão com $D_2 \approx 2,3$ e $m = 8$, c: reconstrução tridimensional do atrator, e d: série temporal.

$\ln C(\epsilon)$ por $\ln \epsilon$ serão aproximadamente iguais ao valor de m se $m < D_2$, convergindo (se isso ocorrer) para um valor fixo de D_2 quando m for suficientemente alto (Fidler-Ferrara e Prado, 1994). Para que a convergência nos valores de $D_2(m)$, calculados para m crescente possa ser confirmado, devem possibilitar a reconstrução e o cálculo de $D_2(m)$ até m da ordem de $2D_2+1$ (Takens, 1981).

Grassberger e Procaccia (1983) afirmaram que séries temporais aleatórias ou estocásticas deveriam ser caracterizadas por um valor de m infinito, ou seja, os valores de $D_2(m)$ não saturariam quando calculados para m crescente porque não possuem um atrator (Figura 1).

A dimensão de imersão m , ou seja o hiperespaço dentro do qual o atrator mencionado está imerso, define o número mínimo de variáveis que devem ser consideradas na descrição da dinâmica do sistema, o que representa o número de variáveis para explicar a variável estudada.

Resultados e Discussão

Como justificativa para a abordagem por teoria dos sistemas dinâmicos foi aplicado o teste *surrogate* (Millán *et al.*, 2009) nos dados a serem analisados. Os resultados da aplicação do teste *surrogate* (Tabela II) são apresentados em termos de número de interações e relativa discrepância entre a série temporal original e o conjunto de dados substitutos (*surrogate*). Admitiu-se a hi-

pótese nula como sendo que a série temporal foi gerada por um processo estacionário estocástico gaussiano, e a rejeitou-se ao nível de significância determinado ($p < 0,05$) de forma que a estrutura não linear e seus

invariantes topológicos ainda estão preservados no *surrogate* (Schreiber e Schmitz, 2000).

O algoritmo de Grassberger e Procaccia (1983) aplicado às variáveis T e RH , dos sítios Amazônia e Pantanal, para a obtenção expoente dimensão de correlação D_2 vs dimensão imersão m (dimensões reais no espaço de fase das variáveis) são apresentados na Figura 2. Para todos os cálculos utilizou-se um tempo de defasagem τ de 5h, obtido pelo método a informação mútua $MI(\tau)$; para a dimensão de imersão m partiu-se de $3m$ (três dimensões reais no espaço de

TABELA II
PARÂMETROS DA CONSTRUÇÃO DAS SÉRIES
SURROGATE

Variáveis microclimáticas	Nº de interações	Discrepância relativa
T (Pantanal)	32	0,0029
Rh (Pantanal)	204	0,0093
T (Amazônia)	52	0,0137
Rh (Amazônia)	63	0,0020

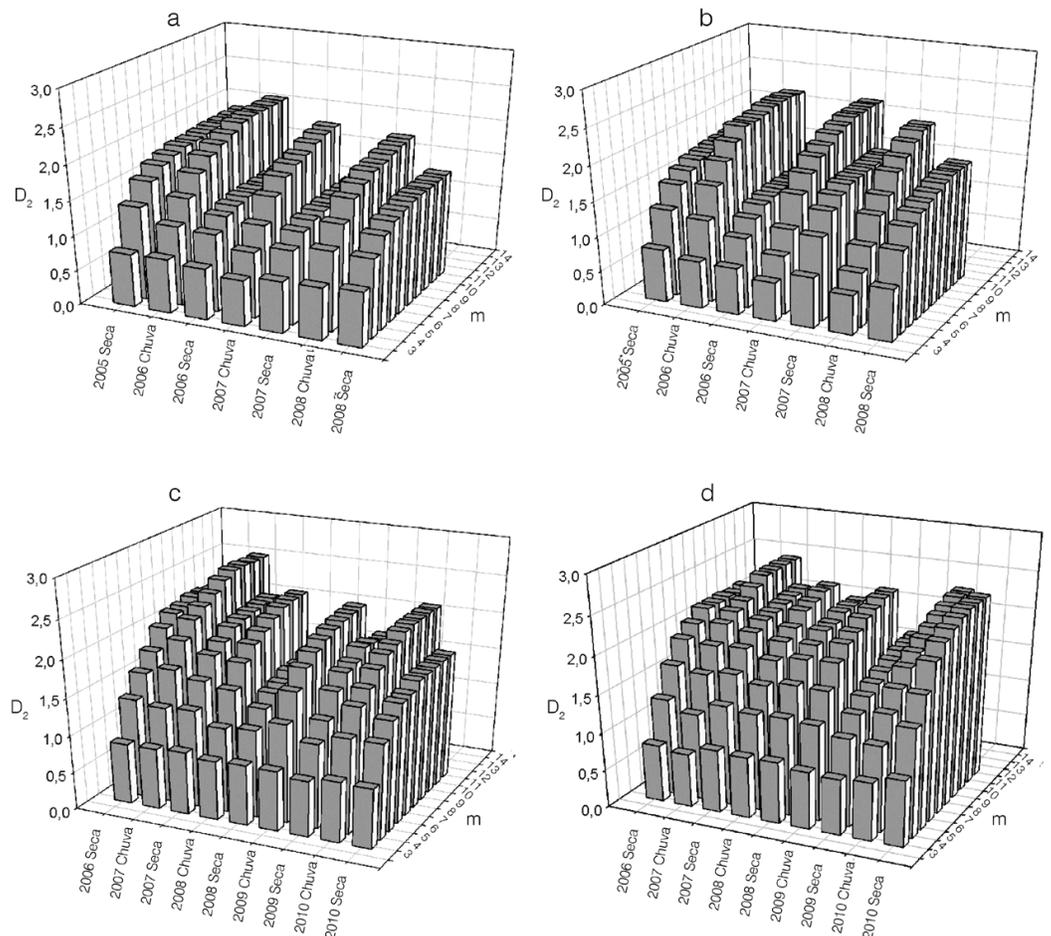


Figura 2. Saturação da dimensão de correlação D_2 vs dimensão de imersão m para a: temperatura, e b: umidade relativa da Amazônia; e para c: temperatura, e d: umidade relativa do Pantanal.

TABELA III
DIMENSÃO DE CORRELAÇÃO D_2 DOS ATRADORES DA TEMPERATURA (T)
E UMIDADE RELATIVA (RH) DOS SÍTIOS EXPERIMENTAIS AMAZÔNIA
E PANTANAL

Ano	Sazonalidade	$D_2(T)$		$D_2(RH)$	
		Amazônia	Pantanal	Amazônia	Pantanal
2005	Seca	1,88 ±0,02	-	1,81±0,02	-
2006	Chuva	2,11 ±0,01	-	2,25 ±0,04	-
2006	Seca	1,38 ±0,01	2,20 ±0,02	1,38 ±0,01	2,17 ±0,01
2007	Chuva	1,99 ±0,01	2,54 ±0,02	2,19 ±0,00	2,44 ±0,01
2007	Seca	1,33 ±0,02	2,13 ±0,03	1,71 ±0,02	2,21 ±0,02
2008	Chuva	1,91 ±0,04	2,26 ±0,00	2,20 ±0,00	2,30 ±0,03
2008	Seca	1,51 ±0,01	1,68 ±0,02	1,71 ±0,01	2,17 ±0,00
2009	Chuva	-	2,18 ±0,01	-	2,31 ±0,03
2009	Seca	-	1,87 ±0,05	-	1,79 ±0,01
2010	Chuva	-	2,14 ±0,01	-	2,28 ±0,02
2010	Seca	-	1,71 ±0,01	-	2,41 ±0,01

fase) incrementando-se 1m para cada cálculo até 14m (14 dimensões reais no espaço de fase) visto que este espaço de imersão do atrator foi suficiente para encontrar saturação de D_2 vs m destas séries temporais, respeitando a relação de Takens (1981) em que $m \geq 2D_2+1$.

Em séries temporais experimentais não lineares com baixa dimensão caótica o expoente D_2 vs m alcança um valor máximo de saturação, esse valor é aproximadamente igual à dimensão fractal do atrator (Grassberger e Procaccia, 1983). O desvio padrão dos valores da Tabela III se refere às pequenas flutuações após a saturação do expoente D_2 .

Entre as séries temporais das variáveis analisadas e períodos considerados existe uma tendência sazonal e interanual da D_2 de T e RH dos dois sítios (Figuras 2 e 3, e Tabela II). A dinâmica da T é mais simples de ser modelada nos dois biomas, e a sua variabilidade sazonal pode estar relacionada com a nebulosidade, que implica variabilidades no padrão do balanço de radiação (Galvão e Fisch, 2000), e consequentemente maiores valores de D_2 no período chuvoso. Ressalta-se ainda que 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 T 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 T (Pereira *et al.*, 2002).

No período seco a D_2 de T para os dois sítios diminuíram

sensivelmente, podendo estar relacionado com a dinâmica global da atmosfera. Durante os meses de maio a setembro (com maior prevalência em julho e agosto) ocorre intensificação de massas de ar frio provenientes do polo sul. Essas frentes frias, por vezes acompanhadas de forte nebulosidade, chegam às regiões do Pantanal e até mesmo Amazônia, promovendo quedas bruscas na temperatura normalmente acompanhadas de ventos associados com ar frio. 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; que em Cuiabá, MT, ao norte do Pantanal, a mínima pode atingir níveis inferiores a 5°C (Brasil, 2003). A ocorrência de chegada de frentes frias nos períodos secos promoveu mudança na amplitude térmica diária (variando subitamente de 18 e 32°C para ~10 e 15°C), das temperaturas mínimas e máximas e da insolação durante alguns dias. Isto deslocou as trajetórias (o conjunto de estados) dos atratores no espaço de fase, o qual migrou de uma frequência quase-periódica para uma frequência periódica subjacente. As séries temporais de T dos períodos chuvosos, embora resultaram em $D_2 > 2$, tiveram amplitude térmica menor do que o período seco, possivelmente pela maior disponibilidade de energia ao sistema, no que diz respeito ao aspecto astronômico da radiação solar, e à maior RH, considerando o alto calor específico da água e seu papel regulador dos ecossistemas e clima global.

As séries temporais de RH apresentaram acoplamento em relação à T, apresentando a mesma sazonalmente nas oscilações em fase da D_2 .

As séries temporais dos biomas estudados parecem apresentar atratores não periódicos de baixa dimensão de correlação D_2 , com sensível variação sazonal, estabilidade ecossistêmica acoplada aos ciclos anuais da forçante radiativa. Os resultados desta análise, mesmo proveniente de dados de baixa frequência de amostragem, corroboram diversas pesquisas que encontraram baixa dimensionalidade caótica para o atrator da T (Zeng *et al.*, 1992; Tsonis *et al.*, 1993; Zeng e Pielke, 1993; Gallego *et al.*, 2001; Sivakumar, 2004; Campanharo *et al.*, 2008).

A Amazônia possui uma dinâmica mais comportada tendendo à periódico ($D_{2(T)Amaz} = 1,73 \pm 0,29$; $D_{2(RH)Amaz} = 1,89 \pm 0,30$), ou seja $D_2 < 2$, enquanto que o Pantanal ($D_{2(T)Pant} = 2,08 \pm 0,26$, $D_{2(RH)Pant} = 2,23 \pm 0,18$) possui uma dinâmica maior que bi periódica e tendendo à não linear de baixa dimensão caótica.

A $D_{2(RH)Pant}$ apresentou oscilações não-periódicas ($D_2 > 2$) em todos os períodos, sendo mais elevadas nos períodos chuvosos; exceto na seca 2009. Importante ressaltar que o início da chuva 2009 do Pantanal começou tardio e o pulso de inundação monomodal que ocorre de janeiro a maio foi de março a junho, caracterizando a seca 2009 (período de pluviosidade muito baixa compreendido entre agosto-setembro) com baixa nebulosidade e solo encharcado, que contribuiu para a RH mais comportada e a $D_{2(RH)Pant}$ mais baixa.

A seca 2010 foi grande e rara, com um dos epicentros sobre o estado de Mato Grosso (Lewis *et al.*, 2011). Em setembro deste ano a reserva RPPN-SESC Pantanal (onde se localiza a torre experimental do Pantanal) sofreu um incêndio florestal de grandes proporções durando ~15 dias até que as primeiras chuvas esparsas ajudaram a controlar o fogo. Grandes incêndios são frequentemente associados à secas severas (Balch *et al.*, 2008; 2011). A queimada muda a estrutura e o microclima da floresta, também induz a morte plantas com hastes menores e afeta as plantas maiores, muda a cobertura do dossel para maior entrada de radiação, alterando o albedo da superfície e o balanço de energia. Em experimento de queimada controlada em floresta Amazônica de transição Balch *et al.* (2008) relatam linha de fogo com movimento lento e de baixa intensidade, característico de fogo sub-bosque em florestas tropicais. Ainda Cochrane *et al.* (1999) e van Nieuwstadt

TABELA IV
DIMENSÃO DE IMERSÃO M DOS ATRADORES DAS SÉRIES DE
TEMPERATURA (T) E UMIDADE RELATIVA (RH)

Ano	Sazonalidade	m (T)		m (RH)	
		Amazônia	Pantanal	Amazônia	Pantanal
2005	Seca	8	-	8	-
2006	Chuva	10	-	8	-
2006	Seca	7	9	7	8
2007	Chuva	11	10	12	11
2007	Seca	6	8	7	10
2008	Chuva	8	11	11	10
2008	Seca	7	10	9	10
2009	Chuva	-	10	-	10
2009	Seca	-	7	-	10
2010	Chuva	-	10	-	12
2010	Seca	-	8	-	9

e Sheil (2005) mediram a T média inicial (56°C) na linha de fogo, atingindo 128°C abaixo do solo (2cm), 273°C na superfície e 87°C acima do solo (100cm). Admitindo condições de contorno semelhantes para o incêndio na RPPN-SESC Pantanal, é provável que a $D_{2(RH)Pant}$ na seca 2010 tenha se sido elevada pela alteração da dinâmica da floresta no que tange a maior variabilidade dos dados da série temporal de RH.

Uma imersão adequada do atrator no espaço de fase é importante para que as suas trajetórias não se cruzem. Grassberger e Procaccia(1983) definem como melhor dimensão de imersão (ou seja, o parâmetro dimensão de imersão m) o valor no qual ocorre a saturação D_2 vs m. Este parâmetro m, também é interpretado como o número mínimo de graus de liberdade necessários para representara dinâmica.

Ecossistemas são sistemas dinâmicos dissipativos que aumentam sua complexidade tanto quanto maior for o número de variáveis envol-

vidas em sua dinâmica (Jorgensen e Fath, 2004). Disto denota-se uma importante aplicação da matemática fractal que é determinar o menor número de equações diferenciais de primeira ordem que podem conter as características qualitativas do sistema dinâmico estudado (Grassberger e Procaccia, 1983).

Foram encontrados valores de dimensão de imersão $m \leq 12$ para todas as séries analisadas (Tabela IV e Figura 4). Assumindo a dimensão de correlação D_2 do atrator aproximadamente igual à dimensão fractal d, satisfazendo as condições da relação de Takens (1981) em que $m \geq 2D_2 + 1$ são necessárias para que as propriedades topológicas do atrator reconstruído sejam preservadas.

As séries temporais de T e RH provenientes do sítio da Amazônia apresentaram variabilidade sazonal quanto à dimensão de imersão m com valores maiores no período chuvoso e valores menores no período seco (Figura 4), embora não estejam completamente em fase como os valores de

D_2 . Quanto ao sítio do Pantanal, a análise se apresenta mais complexa (Figura 4), visto a observação de alguma variabilidade sazonal acompanhada de certa estagnação de m para a RH, mantendo valor fixo por cinco sazonalidades, muito provavelmente pelos elevados valores de evapotranspiração nos períodos secos (Biudes *et al.*, 2009).

Embora foram encontrados resultados com variações sazonais para a maioria dos parâmetros ora analisados neste artigo, é importante ressaltar que existe também uma variação interanual do comportamento do microclima ecossistêmico. Outro aspecto importante é considerar o fato de que m representa número mínimo de equações diferenciais de primeira ordem necessárias para modelar o sistema estudado (Grassberger e Procaccia, 1983), logo a estagnação de $m_{(RH)Pant}$ poder estar relacionado com um valor fixo das variáveis necessárias para a modelagem e a variação de $D_{2(RH)Pant}$ estar relacionada com variação dos valores destas variáveis. Não surgem novas variáveis, mas sim os parâmetros de controle são alterados sazonalmente e interanualmente.

Ainda sobre o Pantanal ressalta-se o menor valor de m para $m_{(T)Pant} = 9$, muito possivelmente uma relação com o pulso monomodal de inundação 2009 e a seca 2009 menos rigorosa. Na seca 2010, cuja $D_{2(T)Pant} = 2,41 \pm 0,01$ foi mais alta do que da maioria das chuvas, o valor de $m_{(RH)Pant} = 9$ ficou abaixo da média. Isto implica que um sistema governado por um atrator caótico não necessariamente possui muitos graus de liberdade, ou seja, o atrator pode ao mesmo tempo ser caótico e ser explicado por um número pequeno de variáveis, assim como os atratores caóticos teóricos de Lorenz (1963), Rössler (1976) e ainda o

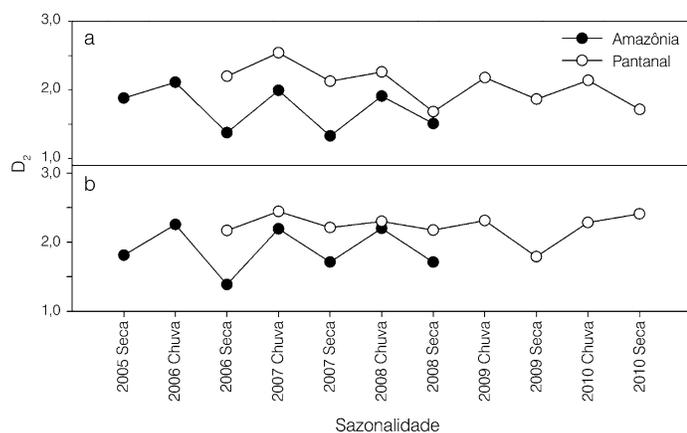


Figura 3. Sazonalidade do parâmetro D_2 para as variáveis temperatura (a) e umidade relativa (b).

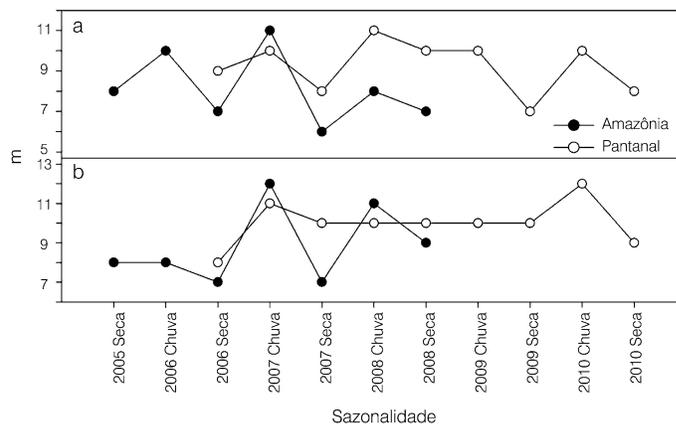


Figura 4. Sazonalidade do parâmetro m para as variáveis temperatura (a) e umidade relativa (b).

atrator da reação Belousov-Zhabotinsky (Zhabotinsky e Zaikin, 1973; Nicolis e Prigogine, 1989). As médias da dimensão de imersão m dos dados analisados foram $m_{(T)Amaz} = 8 \pm 2$; $m_{(RH)Amaz} = 9 \pm 2$; $m_{(T)Pant} = 9 \pm 1$; e $m_{(RH)Pant} = 10 \pm 1$.

Todos os graus de liberdade do microclima do ecossistema são de algum modo interligados, logo se tem fluxos de matéria, energia, e momento entre os diversos subsistemas que o compõem. Os microclimas ecossistêmicos objeto desta análise são subsistemas do sistema global, ora se expande abarcando mais graus de liberdade (m) e ora se contrai diminuindo o número das variáveis mais relevantes para a compreensão dos estados do atrator. Lorenz (1991) afirma “que o ambiente pode ser visto como subsistemas de baixo acoplamento. Nesse caso, os estudos tentam avaliar a dimensão do subsistema”.

Assim como Hastings *et al.* (1993) e McCann (2000), especula-se sobre a possibilidade da existência de relação direta entre a complexidade de um microclima e a sua estabilidade dinâmica. Para um sistema microclimático, quanto maior a sua complexidade (ou seja, a dimensão fractal) maior a capacidade de seus m graus de liberdade se acoplar as perturbações; no caso inverso (dimensão fractal menor) uma pequena perturbação na dinâmica do atrator pode fazê-lo buscar outros pontos de equilíbrio, causando mudanças no microclima.

Conclusão

Séries temporais de variáveis micrometeorológicas medidas na floresta Amazônica e no Pantanal apresentam atratores estranhos periódicos e tendendo à caóticos de baixa dimensão, governando a dinâmica desses biomas, sendo que das variáveis analisadas o atrator reconstruído da temperatura (T) é o mais simples e da umidade relativa (RH) se exibe como o mais complexo de ser modelado.

A dimensão de correlação D_2 (dimensão fractal) oscilou em fase sazonalmente e a dimensão de imersão m variou em fase sazonalmente na Amazônia e entre os anos analisados no Pantanal. Para os dados analisados, a Amazônia apresentou expoente da dimensão de correlação D_2 e dimensão de imersão m menor do que o Pantanal.

O método se apresentou sensível à sazonalidade e variabilidade interanual, e também detectou

mudanças no microclima causadas por queimada florestal e a sua resposta microclimática. Numa perspectiva futura, esta ferramenta pode vir a contribuir com avanços na compreensão e modelagem desses eventos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio com bolsa de estudos de Pós Graduação, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) através do Programa de Apoio a Núcleos de Excelência (PRONEX) pelo apoio financeiro para coleta de dados do projeto de pesquisa processo N° 823971/2009.

REFERÊNCIAS

- Abarbanel HDI, Brow R, Sidorowich JJ, Tsimring LS (1993) The analysis of observed chaotic data in physical systems. *Rev. Mod. Phys.* 65: 1331-1392.
- Achard F, Eva HD, Stibig HJ, Mayaux P, Gallego J, Richards T, Maligreau JP (2002) Determination of deforestation rates of the world's humid tropical forest. *Science* 297: 999-1002.
- Arieira J, Nunes da Cunha C (2006) Fitosociologia de uma floresta inundável monodominante de *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae), no Pantanal Norte, MT, Brasil. *Acta Bot. Brás.* 20: 569-580.
- Baker GL, Gollub JP (1996) *Chaotic Dynamics: An Introduction*. Cambridge University Press: Nova York, EEUU. 256 pp.
- Batistella M, Moran EF, Alves DS (2008) *Amazônia: Natureza e Sociedade em Transformação*. Universidade de São Paulo. Brasil. 304 pp.
- Biudes MS, Campelo JrJH, Nogueira JS, Sanches L (2009) Estimativa do balanço de energia em camarazal e pastagem no norte do pantanal pelo método da razão de Bowen. *Rev. Brás. Meteorol.* 24: 135-143.
- Brasil (2011) *Mudança do Clima no Brasil: Aspectos Econômicos, Sociais e Regulatórios*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Secretaria de Assuntos Estratégicos. Brasília, Brasil. 438 pp.
- Campanharo ASLO, Ramos FM, Macau EEN, Rosa RR, Bolzan MJA, Sá LDA (2008) Searching chaos and coherent structures in the atmospheric turbulence above the Amazon forest. *Phil. Trans. Roy. Soc. A* 366: 579-589.
- Cochrane MA, Alencar A, Schulze MD, Souza Jr CM, Nepstad DC, Lefebvre P Davidson EA (1999) Positive feedbacks in the fire dynamic of closed canopy tropical forests. *Science* 284: 1832-1835.
- Cook KH, Visy EK (2008) Effects of twenty-first-century climate change on the amazon rain forest. *J. Climate* 21: 542-560.
- Costa MH, Pires GF (2010) Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int. J. Climate*

tol. 30: 1970-1979.

- Eckmann JP, Ruelle D (1985) Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Rev. Mod. Phys.* 57: 617-656.
- Fiedler-Ferrara N, Prado CPC (1995) *Caos: Uma Introdução*. Blucher. São Paulo, Brasil. 402 pp.
- Fraedrich K (1986) Estimating the dimensions of weather and climatic attractors. *J. Atmos. Sci.* 43: 419-432.
- Fraser AM, Swinney HL (1986) Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Phys. Rev. A* 33: 1134-1140.
- Gallego MC, Garcia JA, Cancillo ML (2001) Characterization of atmospheric turbulence by dynamical systems techniques. *Bound. Layer Meteorol.* 100: 375-392.
- Gallon MMP, Sanches L, Paulo SR (2006) Fluxo e perfil de dióxido de carbono no dossel uma floresta tropical de transição Amazônica. *Rev. Bras. Meteorol.* 21: 291-300.
- Galvão JAC, Fisch G (2000) Balanço de energia em áreas de floresta e de pastagem na Amazônia (Ji-Paraná, RO). *Rev. Bras. Meteorol.* 15: 25-37.
- Gan MA, Kousky VE, Ropelewski CF (2004) The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over West-Central Brazil. *J. Climate* 17: 47-66.
- Gomes AG, Varriale MC (2004) *Modelagem de Ecossistemas: Uma Introdução*. Universidade Federal de Santa Maria. Brasil. 503 pp.
- Grassberger P, Procaccia I (1983) Characterization of strange attractors. *Am. Phys. Soc.* 50: 346-349.
- Hastings A, Hom LC, Ellner S, Turchin P, Godfray HCJ (1993) Chaos in ecology: is mother nature a strange attractor? *Annu. Rev. Ecol. Systemat.* 24: 1-33.
- INMET (2009) *Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990*. Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília, Brasil. 465 pp.
- IPCC (2007) *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Genebra, Suíça. 104 pp.
- Jorgensen SE, Fath BD (2004) Application of thermodynamic principles in ecology. *Ecol. Complex.* 1: 267-280.
- Lewis SL, Brando PM, Phillips OL, Van Der Heijden GMF, Nepstad D (2011) The 2010 Amazon drought. *Science* 331: 554.
- Lorenz EN (1963) Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* 20: 130-141.
- Lorenz EN (1991) Dimension of weather and climate attractors. *Lett. Nature* 353: 241-244.
- Mandelbrot BB (1977) *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman. Nova York, EEUU. 468 pp.
- Marengo JA, Liebmann B, Kousky VE, Filizola NP, Wainer IC (2001) Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon Basin. *J. Climate* 14: 833-852.
- Margulis S (2004) *Causes of Deforestation of the Brazilian Amazon*. World Bank, Washington, EEUU. 107 pp.
- McCann KV (2000) The diversity-stability debate. *Nature* 405: 228-233.
- Millán H, Kalauzi A, Llerena G, Sucoshañay, Piedra D (2009) Meteorological complexi-

- ty in the Amazonian area of Ecuador: An approach. *Ecol. Complex.* 6: 278-285.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis*. World Resources Institute. Washington, DC, EEUU. 80 pp.
- Nicolis C, Nicolis G (1984) Is there a climatic attractor? *Nature* 311: 529-532.
- Nicolis G, Prigogine I (1989) *Exploring Complexity: An Introduction*. Freeman. Nova York, EEUU. 312 pp.
- Pereira RA, Angelocci LR, Sentelhas PC (2002) *Agrometeorologia: Fundamentos e Aplicações Práticas*. Agropecuária. Guaiaba, Brasil. 478 pp.
- Povedo-Jaramillo G, Puente CE (1993) Strange attractors in atmospheric boundary-layer turbulence. *Bound. Layer Meteorol.* 64: 175-197.
- Proczenzale A, Smith LA, Vio R, Murante G (1992) Distinguishing between low-dimensional dynamics and randomness in measured time series. *Physica D* 58: 31-49.
- Rössler OE (1976) An equation for continuous chaos. *Phys. Lett. A* 57: 397-398.
- Schreiber T, Schmitz A (2000) Surrogate time series. *Physica D* 142: 346-382.
- Shaeffer R, Rodrigues RLV (2005) Underlying causes of deforestation. *Science* 307: 1046-1047.
- Sivakumar B (2004) Chaos theory in geophysics: past, present and future. *Chaos Solit. Fract.* 19: 441-462.
- Takens F (1981) Detecting strange attractors in turbulence. *Lect. Notes Math.* 898: 366-381.
- Theiler J, Eubank S, Longtin A, Galdrikian B, Farmer JD (1992) Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data. *Physica D* 58: 77-94.
- Tsonis AA, Elsner JB, Georgakakos KP (1993) Estimating the dimension of weather and climate attractors: important issues about the procedure and interpretation. *J. Atmos. Sci.* 50: 2549-2555.
- van Nieuwstadt MGL, Sheil D (2005) Drought, fire and tree survival in a Borneo rain forest, East Kalimantan, Indonesia. *J. Ecol.* 93: 191-201.
- Xin L, Fei H, Gang L (2001) Characteristics of chaotic attractors in atmospheric boundary layer turbulence. *Bound. Layer Meteorol.* 99: 335-345.
- Zeng X, Pielke RA (1993) What does a low-dimensional weather attractor mean? *Phys. Lett. A* 175: 299-304.
- Zeng X, Pielke RA, Eykholt R (1992) Estimating the fractal dimension and the predictability of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.* 48: 649-659.
- Zhabotinsky AM, Zaikin AN (1973) Autowave processes in a distributed chemical system. *J. Theor. Biol.* 40: 45-61.

SEASONAL AND INTERANUAL VARIABILITY OF THE FRACTAL DIMENSION OF TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY SERIES IN THE AMAZONIA AND PANTANAL

Geison Jader Mello, Iramaia Jorge Cabral De Paulo, Sérgio Roberto De Paulo, Raphael De Souza Rosa Gomes, Nadja Gomes Machado, José De Souza Nogueira and Marcelo Sacardi Biudes

SUMMARY

The rise in global average temperature, change in rainfall regime, the occurrence of more stringent droughts and floods, as well as the accelerated deforestation, all stress the need of describing and understanding the ecosystems. The time series analysis approach of the dynamic systems theory allows to characterize the nonlinear behavior of forest systems. The aim of this study was to analyze data from micrometeorological towers measured above the forest canopy in experimental sites in the Amazon and the Brazilian Pantanal, searching for climatic attractors with low fractal dimensions of the temperature (T)

and relative humidity (RH) variables in the period 2005-2010. The annual and inter-annual sensitive variation of the estimates of fractal dimension, the exponent correlation dimension D_2 ($D_{2(T)Amaz} = 1,73 \pm 0,29$; $D_{2(RH)Amaz} = 1,89 \pm 0,30$; $D_{2(T)Panti} = 2,08 \pm 0,26$; $D_{2(RH)Panti} = 2,23 \pm 0,18$) and the embedding dimension m ($m_{(T)Amaz} = 8 \pm 2$; $m_{(RH)Amaz} = 9 \pm 2$; $m_{(T)Panti} = 9 \pm 1$; $m_{(RH)Panti} = 10 \pm 1$) strongly suggest the existence of periodic attractors and low dimension chaotic attractors governing the dynamics of these biomes. The exponent D_2 of the attractors varied in phase seasonally and was sensitive to forest fires.

VARIABILIDAD ESTACIONAL E INTERANUAL DE LA DIMENSIÓN FRACTAL DE SERIES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE LA AMAZONIA Y PANTANAL

Geison Jader Mello, Iramaia Jorge Cabral De Paulo, Sérgio Roberto De Paulo, Raphael De Souza Rosa Gomes, Nadja Gomes Machado, José De Souza Nogueira y Marcelo Sacardi Biudes

RESUMEN

El aumento de la temperatura media global, el cambio en el régimen de lluvias, la ocurrencia de sequías e inundaciones más severas, así como la aceleración de la deforestación, enfatizan la necesidad de la descripción y comprensión de los ecosistemas. El análisis de series de tiempo bajo el enfoque de la teoría de sistemas dinámicos permite caracterizar el comportamiento no lineal de los sistemas forestales. El objetivo de este estudio fue analizar los datos provenientes de torres micrometeorológicas medidos por encima de la cubierta forestal en los sitios experimentales en la Amazonia y el Pantanal de Brasil, en busca de atractores climáticos de baja dimensión fractal de

las variables temperatura (T) y humedad relativa (RH) durante el período 2005-2010. La sensible variación anual e interanual de las estimaciones de la dimensión fractal (dimensión de correlación) D_2 ($D_{2(T)Amaz} = 1,73 \pm 0,29$; $D_{2(RH)Amaz} = 1,89 \pm 0,30$; $D_{2(T)Panti} = 2,08 \pm 0,26$; $D_{2(RH)Panti} = 2,23 \pm 0,18$) y el tamaño de la dimensión de inmersión m ($m_{(T)Amaz} = 8 \pm 2$; $m_{(RH)Amaz} = 9 \pm 2$; $m_{(T)Panti} = 9 \pm 1$; $m_{(RH)Panti} = 10 \pm 1$) sugieren fuertemente la existencia de atractores extraños de baja dimensión que rigen la dinámica de estos biomas. El exponente D_2 de los atractores osciló en fases estacionales y presentó sensibilidad a los incendios forestales.