

ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE A DINÂMICA COMPLEXA DO FENÔMENO EL NIÑO E A TEMPERATURA DO AR EM CUIABÁ/MT NO PERÍODO DE 1961-2013

STÉFANO TEIXEIRA SILVA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso | Brasil
stefano.silva@plc.ifmt.edu.br

SÉRGIO ROBERTO DE PAULO

Universidade Federal de Mato Grosso | Brasil
sergio@ufmt.br

PALAVRAS-CHAVE:

Dinâmica complexa
Temperatura do ar
Índice Oceânico Niño

RESUMO:

Atualmente devido à intensa modificação do ambiente natural e às alterações climáticas em escala global, muitos pesquisadores têm sido motivados a investigar relações entre a dinâmica do fenômeno El Niño e variáveis climatológicas. O estudo foi desenvolvido com dados de temperatura diária da estação climatológica de Cuiabá-MT, fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) por meio do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) no período de 1961-2013. Os indícios de uma possível conexão entre os estados dinâmicos da temperatura do ar e do Índice Oceânico Niño – ONI foram verificados por meio da análise de dimensionalidade fractal da série. Os resultados apontam para a existência de um sistema climático com dinâmica de regulação de baixa dimensionalidade e presença de caos determinístico. A evolução temporal dos parâmetros não lineares obtidos apresenta uma dinâmica complexa que pode estar relacionado às flutuações do índice ONI.

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN THE COMPLEX DYNAMICS OF EL NIÑO AND THE AIR TEMPERATURE IN CUIABÁ/MT IN THE 1961-2013 PERIOD

ABSTRACT:

Currently due to intense modification of the natural environment and global climate change, many researches has been motivated to investigate relationships between El Niño phenomena dynamics and climatological variables. The study was conducted with data from the meteorological station of Cuiabá, provided by INMET (National Institute of Meteorology) through of BDMEP (Meteorological Data Bank for Education and Research) in the 1961-2013 periods. The evidence of a possible connection between air temperature dynamic states and the Oceanic Niño Index - ONI, were verifying by fractal dimensionality analysis of the series. The results point to the existence of a climate system with low dimensionality dynamic regulation and presence of deterministic chaos. The temporal evolution of the nonlinear parameters obtained presents a complex dynamic that can be related to ONI index fluctuations.

KEYWORDS:

Complex dynamics
Air temperature
Oceanic Niño Index

**ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA DINÁMICA COMPLEJA DE EL NIÑO Y LA
TEMPERATURA DEL AIRE EN CUIABÁ/MT EN EL PERÍODO 1961-2013**

PALABRAS CLAVE:
Dinámicas complejas
Temperatura del aire
Oceanic Niño Index

RESUMEN:

En la actualidad, debido a la intensa modificación del entorno natural y el cambio climático a escala global, muchos investigadores han motivado a investigar la relación entre la dinámica de El Niño y las variables climáticas. El estudio se realizó con datos diarios de temperatura de la estación meteorológica de Cuiabá-MT, proporcionados por INMET (Instituto Nacional de Meteorología) por BDMEP (Banco de Datos Meteorológicos de Educación e Investigación) en el período 1961-2013. La evidencia de una conexión entre los estados dinámicos de la temperatura del aire y de Oceanic Niño Índice - ONI se verificó mediante análisis de dimensionalidad fractal de la serie. Los resultados apuntan a la existencia de un sistema climático con la regulación del clima dinámico de baja dimensionalidad y la presencia de caos determinista, la evolución temporal de los parámetros no lineales obtenidos muestran una dinámica compleja que puede estar relacionado y la influencia de las oscilaciones del índice ONI.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país que tem uma grande diversidade de ecossistemas, em que a região do Estado de Mato Grosso tem uma importância especial no que diz respeito à questão das mudanças climatológicas globais, pois é uma região marcada por uma intensa influência antropogênica, onde está localizado, por exemplo, o chamado arco do desmatamento, onde há um grande uso e ocupação do solo (DE PAULO, et al., 2015).

Os efeitos da ação antrópica já podem ser notados em grandes ecossistemas como, por exemplo, Amazônia, Cerrado, Pantanal, etc., em que a diminuição da biodiversidade e de recursos naturais, devido também às queimadas e desmatamento, tem sido um grave problema (SILVA, 2015).

Salati (2001) aponta que o atual equilíbrio dinâmico da atmosfera está sujeito a forças de transformação que levam às variações climáticas e podem ser estudadas sob três diferentes aspectos, que podem ser generalizados como: variações climáticas devido às variações climáticas globais, decorrentes de causas naturais (El Niño, por exemplo); variações climáticas de origem antrópicas, decorrentes de alterações do uso da terra dentro da própria região em estudo; variações climáticas decorrentes das mudanças climáticas globais provocadas por ações antrópicas.

Clima é uma síntese de natureza estatística do estado da atmosfera ou das suas fronteiras, referente a uma determinada área e a um determinado período de tempo. Para efetuar essa síntese usam-se métodos da estatística matemática aplicada aos elementos climáticos que definem e caracterizam o clima (ANTUNES, 2007).

O clima que experimentamos resulta de comportamentos ora ordenados ora caóticos e o resultado disso é um sistema com características de ambos. O sistema climático da Terra tem muitos processos dinâmicos diferentes operando em escala espaço-temporal, portanto sendo tipicamente identificado como complexo (SHUANGCHENG et al., 2006).

Sistemas climáticos complexos têm propriedades que não podem ser completamente identificadas apenas pelo entendimento de partes do sistema. As propriedades do sistema são distintas das partes, e elas dependem da integridade do todo; as mesmas podem não se apresentarem quando o sistema é quebrado em várias partes (GALLAGHER; APPENZLER, 1999). Assim, modelos matemáticos são muito úteis, mas às vezes se torna necessário analisar sistemas sem que se conheçam detalhes sobre sua dinâmica, como no caso de dados obtidos experimentalmente. Assim, nem sempre é possível criar um modelo simplificado que represente o problema (SIMONI, 2008).

Existem vários métodos para identificar e medir o comportamento caótico em séries temporais experimentais, dependendo do que se quer caracterizar no sistema. As técnicas incluem análise visual simples da série temporal representada por um gráfico no tempo da trajetória ou do atrator reconstruído; análise das frequências e ciclos dominantes das séries temporais (Fast Fourier Transformer – FFT, Singular Spectrum Analysis – SSA); análise da estabilidade usando expoente de Lyapunov; análise de entropia, entre outras, etc.

O clima envolve um número muito grande de variáveis interdependentes em que, uma perturbação em uma das variáveis pode tornar o sistema imprevisível. O sistema climático da Terra é uma excelente ilustração disso, tendo muito diferentes processos dinâmicos operar em todas as escalas espaço-temporais e pode normalmente ser visto como bastante complexo (LORENZ, 1963, 1991).

Sistemas climáticos complexos têm propriedades que não podem ser completamente identificadas pelo entendimento das partes do sistema. As propriedades do sistema são distintas das propriedades das partes, e elas dependem da integridade do conjunto; as propriedades sistêmicas desaparecem quando o sistema é analisado em partes, ao passo que as propriedades das partes são mantidas (GALLAGHER; APPENZLER, 1999).

Estimativa da complexidade é de grande interesse na previsão de mudanças climáticas. Por exemplo, as técnicas para calcular a complexidade de séries temporais climáticas envolvem frequentemente o cálculo do expoente de Lyapunov, dimensão de correlação e da complexidade de Kolmogorov, etc. Esses métodos dinâmicos não lineares são poderosas abordagens para a compreensão dos sistemas climáticos complexos. Os cálculos, no entanto, geralmente necessitam de conjuntos de dados longos que podem ser difíceis ou impossíveis de se obter (RICHMAN; MOORMAN, 2000).

A variação da temperatura do ar depende de alguns fatores, tais como: altitude, latitude, longitude e distância dos oceanos (PEREIRA, et al., 2002). Considerando as variações da temperatura do ar como um importante fator no estudo de alteração climática global e modelagem de ecossistemas, faz-se necessário uma investigação e caracterização da mesma com a utilização de técnicas estatísticas de análise de séries temporais para compreensão dos processos e fenômenos físicos envolvidos.

Assim, por meio apenas da variável temperatura seria possível investigar e caracterizar a dinâmica climática do sistema, a evolução temporal dos parâmetros de dinâmica não linear da temperatura e a influência do fenômeno El Niño sobre os padrões não lineares da dinâmica climática da variável.

A interação oceano-atmosfera-superfície terrestre tem grande influência no sistema climático da Terra. Os processos de troca de energia e umidade entre a superfície dos oceanos, atmosfera e superfície terrestre podem determinar o comportamento do clima em todo o mundo. Dentre os fenômenos climáticos mais conhecidos, está o El Niño Oscilação Sul ENOS (FÉLIX, 2003).

O ENOS é constituído de dois componentes, um oceânico e outro atmosférico. O componente oceânico é caracterizado por anomalias da temperatura das águas da superfície do Oceano Pacífico Equatorial junto à costa oeste da América do Sul e é atualmente monitorado através da Temperatura da Superfície do Mar (TSM). A componente atmosférica também conhecida como Oscilação Sul (OS) expressa a correlação inversa existente entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do Oceano Pacífico (GLANTZ, 2001).

A condição normal da TSM na região central da Bacia do Oceano Pacífico é a concentração de águas quentes na parte oeste e de águas frias na região leste. A essa condição normal de águas do Oceano Pacífico denomina-se de ano neutro ou Neutralidade Climática. Quando as águas quentes migram para a região leste da bacia do Pacífico equatorial, define-se o EL Niño, onde a anomalia TSM é positiva e La Niña quando negativa (GRIMM et al, 1998; BERLATO; FONTANA, 2003; PAULA et al., 2009).

Diante do exposto, é possível utilizando a temperatura média do ar, investigar e caracterizar a dinâmica climática do sistema, a evolução temporal dos parâmetros de dinâmica não linear da mesma, por intermédio da dimensionalidade fractal e relacionar a influência do fenômeno El Niño sobre os padrões não lineares da dinâmica climática dessa variável em Cuiabá-MT.

MATERIAL E METODOLOGIA

Descrição da área de estudo

O estudo foi desenvolvido com dados de temperaturas médias diárias tomadas a partir de temperaturas máximas e mínimas da estação climatológica de Cuiabá-MT (Figura 1), localizada nas coordenadas geográficas 15°61'56" de latitude Sul e 56°06'01" de longitude Oeste, fornecido pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) por meio do BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) no período de 1961-2013.

Apesar do BDMEP disponibilizar os dados desde o ano de 1961 de temperaturas médias diárias, a Estação de Cuiabá tem uma falha no período de 1990-1997. Dessa maneira foram criadas duas janelas de dados para serem analisadas, a saber: janela 1 (1961-1989) e janela 2 (1998-2013), cada uma dividida em seções de intervalos de 2 anos.

O clima de Cuiabá é do tipo tropical quente e semiúmido, com duas estações definidas pela distribuição das chuvas: estação chuvosa (primavera-verão) e estação seca (outono-inverno). Índices pluviométricos variam de 1200 a 1500 mm (MAITELLI, 2005; GOMES, 2010).

Cuiabá está a uma altitude de 165 metros acima do nível do mar, variando em sua área urbana de 146 a 250 metros. Situa-se na chamada "depressão cuiabana" que consiste numa península de erosão, onde predominam relevos de baixas amplitudes (FRANCO, 2013).

O BDMEP é um banco de dados para apoiar as atividades de ensino e pesquisa e outras aplicações em meteorologia, hidrologia, recursos hídricos, saúde pública, meio ambiente, etc. O Banco abriga dados meteorológicos diários em forma digitais, referentes a séries históricas da rede de estação do INMET (291 estações meteorológicas convencionais) num total de cerca de 3 milhões de informações, referentes às medições diárias, de acordo

com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial (OMM). (BDMEP, 2013)

No BDMEP estão acessíveis os dados diários a partir de 1961 das estações para as quais se dispunha em forma digital, de pelo menos 80% dos dados que foram registrados naquele período. Os dados históricos referentes a períodos anteriores a 1961 ainda não estão digitalizados e, portanto, estão indisponíveis no BDMEP. (BDMEP, 2013).

Figura 1 - Localização geográfica de Cuiabá no mapa do estado de Mato Grosso.



Fonte: OLIVEIRA, 2007.

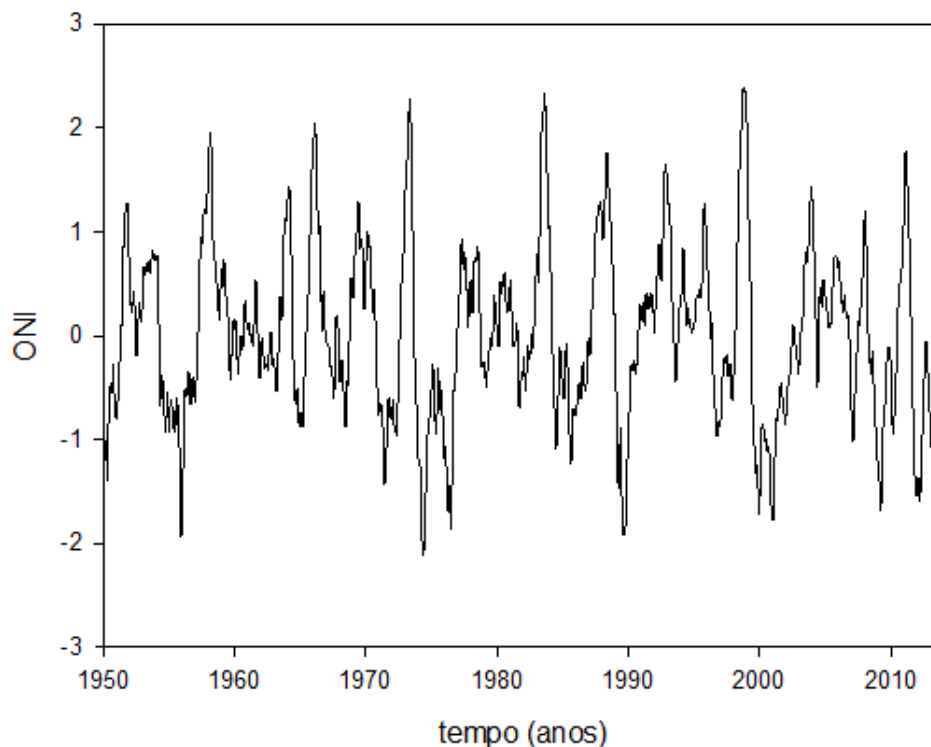
Adotou-se um conjunto de critérios para o preenchimento dos dados observados tentando assegurar um período temporal de análise que de acordo com as recomendações da OMM (Organização Mundial de Meteorologia), o comprimento do período de registro dos dados deve ser igual ou superior a 30 anos. Os critérios foram:

- I) A estação selecionada deveria ter no máximo 10% de falhas de observação em cada janela criada para análise.
- II) Para falhas de 1 dia utilizou-se a média aritmética entre os valores dos em dias antecessores e sucessores sem falha.
- III) Para falhas de 2 ou mais dias utilizou-se a média aritmética entre os valores dos mesmos instantes em semanas antecessores e sucessores sem falha.
- IV) Não se realizava o preenchimento caso a falha fosse maior (falhas mensais ou anuais) que nos casos anteriores com o propósito de preservar a dinâmica do sistema.

Os anos de ocorrência e duração dos eventos El Niño e La Niña, assim como os valores do ONI, foram retirados de NOAA/National Weather Service – Climate Predict Center (2013). O ONI é um índice que identifica as anomalias da superfície do mar na região do Niño 3.4, entre as coordenadas 50N–50S e 170–1200W no Oceano Pacífico, por meio de uma média móvel de três meses. Quando o índice for maior que +0,5°C por, no mínimo, cinco meses consecutivos, é caracterizado um El Niño; quando menor que -0,5°C por, no

mínimo, cinco meses consecutivos, é caracterizado uma La Niña. As variações do índice ONI estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Variações do ONI entre janeiro de 1950 e junho de 2013. O tempo na abcissa é dado pelo ano-calendário.



Descrição da Metodologia

Informação mútua

O critério de informação mútua surge da teoria de informação, embora seja aplicado em outras áreas tais como reconhecimento de padrões, processamento de imagens, seleção e identificação de variáveis de entrada para modelos não lineares (ZAFFALON E HUTTER, 2002).

A partir da série temporal de uma variável pertencente a um sistema dinâmico e das séries obtidas a partir da defasagem temporal da série original por um intervalo de tempo fixo, chamado de “tempo de defasagem” (“*time lag*” ou “*time delay*”), é possível estimar a dimensionalidade de um sistema (NICOLIS and PRIGOGINE, 1989; ECKMANN e RUELLE, 1985; ABARBANEL et al., 1993).

A ideia para a determinação do tempo de atraso (*time delay* “ τ ”) adequado para a reconstrução do espaço de fase ou estado é obter variáveis defasadas mais independentemente possíveis. FRASER E SWINNEY (1986) estabeleceram que o tempo de atraso estivesse relacionado com o primeiro mínimo local da medida da informação mútua de uma série temporal, que é o método utilizado neste trabalho. A função $I_{(\tau)}$ é definida como:

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

em que: $P(S_n)$ é a probabilidade da medida S_n , $P(S_{n+\tau})$ é a probabilidade da medida $S_{n+\tau}$ e $P(S_n, S_{n+\tau})$ é a probabilidade conjunta da medida S_n e $S_{n+\tau}$. Quando as medidas S_n e $S_{n+\tau}$ são completamente independentes, $I_{(\tau)}=0$. Por outro lado, quando as medidas S_n e $S_{n+\tau}$ são iguais, $I_{(\tau)}$ é máximo. Portanto a análise da curva de $I_{(\tau)}$ determina o melhor tempo de defasagem para reconstrução do espaço de fase (FRASER & SWINNEY, 1986; MILAN et al., 2009; VIOLA et al., 2010).

Pode-se definir informação mútua informalmente como uma medida da quantidade de informação que uma variável aleatória contém a respeito de outra (VIDAL, 2012).

A função $I_{(\tau)}$ fornece as mesmas informações que a função de autocorrelação fornece em sistemas linear sendo, na realidade, um tipo de generalização para sistemas não lineares (SAVI, 2006).

Para o cálculo da *Mutual Information* (MI) utilizou-se o programa *mutual.exe* do pacote de software TISEAN – (disponível em http://www.mpiipks-dresden.mpg.de/~tisean/TISEAN_2.1/).

Dimensão de correlação

A observação da mudança nos padrões de variáveis meteorológicas devido à ação antrópica leva em conta a perspectiva de que as mesmas seguem uma dinâmica não linear. A reconstrução da dinâmica do sistema que originou os padrões de possíveis alterações climáticas, mesmo com apenas uma medida escalar, é possível. O teorema que nos garante a possibilidade de tal análise, ou seja, que nos permite a transição de um conjunto de observações escalares para um espaço de fase multivariado é atribuído a Takens (1981), sendo conhecido como teorema de imersão (MELLO, 2010).

Embora o atrator reconstruído pelo método de Takens não seja idêntico ao original, pode-se demonstrar que as propriedades topológicas são preservadas. A dimensão m do espaço de fase reconstruído não é necessariamente idêntica à dimensão d do espaço de fase real dos vetores, que representam a dinâmica do sistema físico (RUELLE, et al, 1986).

Um algoritmo largamente usado para o cálculo da dimensão de uma série temporal é o de dimensão de correlação proposto por GRASBERGER E PROCACIA, 1983.

Seja m um número positivo inteiro e r um número real positivo. Dada uma série de dados do tipo:

$$u_{(1)}, u_{(2)}, u_{(3)}, \dots, u_{(n)} \quad (2)$$

de medidas igualmente espaçadas no tempo, de uma sequência de vetores:

$$x_{(1)}, x_{(2)}, x_{(3)}, \dots, x_{(N-m+1)} \text{ em } R^m \quad (3)$$

definidos por:

$$x_{(i)} = [u_{(i)}, u_{(i+1)}, \dots, u_{(i+m-1)}] \quad (4)$$

Um ponto de referência é escolhido destes dados e todas as distâncias $|X_i - X_j|$ dos $N - 1$ pontos restantes são computadas. Isto permite calcular os pontos do conjunto de dados que estão dentro de uma distância r do ponto X_i no espaço de fase. Repetindo o processo para todos os valores de i , chega-se à quantidade:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta(r - |X_i - X_j|) \quad (5)$$

onde θ é a função de Heaviside, que obedece as seguintes condições de contorno:

$$\begin{cases} \theta(x)=0, & \text{se } x < 0. \\ \theta(x)=1, & \text{se } x > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Os valores não nulos de $C(r)$ medem a extensão em que a presença de um ponto de dados afeta a posição de outros pontos. $C(r)$ pode também ser entendido como uma função de correlação integral do atrator.

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

$$C(r) \sim r^d \quad (7)$$

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

$$\ln C(r) = d \ln r \quad (8)$$

em que a quantidade d é a dimensão de correlação proposta por GRASSBERGER e PROCACCIA (1983).

Usualmente estima-se o coeficiente angular da região linear obtido através do gráfico de “joelhos”. Esse coeficiente angular é então considerado uma estimativa da dimensão de correlação D_2 da projeção do atrator original no espaço reconstruído m dimensional. Para considerar a estimativa de D_2 como se fosse a dimensão do sistema é necessário usar um número grande de valores de n . A dimensão D_2 é uma das principais ferramentas para identificar a existência de dinâmica caótica. No caso de sinais determinísticos, esse valor de D_2 atinge um valor máximo devido à natureza de baixa dimensão do sistema (WANG e CHEN, 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros necessários para a reconstrução do espaço de fase dos atratores, tempo de defasagem temporal τ (*Mutual Information*) e dimensão de imersão m (*FNN*), estão descritos na tabela 1. Estes parâmetros possibilitam inferir quanto um dado da série, em determinado instante, está correlacionado com o seu futuro. Também permite avaliar o quão rápido é a mudança no padrão de comportamento das variáveis (MELLO et al., 2016).

É possível observar que o *tempo de defasagem* (dados em dias para as séries de temperatura do ar e em meses para a série ONI) máximo foi 173 dias na seção 3 da janela 1 e o mínimo foi 66 dias da seção 2 da mesma janela. A dimensão de imersão variou de 4 a 8, em ambos os casos os resultados mostram-se independentes do tamanho da janela, sendo, portanto próprios da dinâmica intrínseca de cada série analisada. Nessa análise o parâmetro τ é definido como o primeiro mínimo da curva de informações e a dimensão de imersão m , definida a partir do valor que não apresenta falsos vizinhos. Quanto maior o valor da dimensão de imersão, mais complexo e difícil é a modelagem do sistema, já que essa dimensão de imersão representa o conjunto de variáveis do sistema.

Tabela 1. Parâmetros para reconstrução do espaço de fase.

Janela 1									
Seção	Período	τ	m	D_2	Seção	Período	τ	m	D_2
1	1961-1962	58	6	1,4127	12	1983-1984	85	6	0,9554
2	1963-1964	36	5	2,3460	13	1985-1986	70	4	1,1503
3	1965-1966	166	6	0,7705	14	1987-1988	64	5	1,4644
4	1967-1968	80	4	1,5887	15	1998-1999	68	8	1,2828
5	1969-1970	51	5	1,6218	16	2000-2001	129	5	0,4731
6	1971-1972	63	5	1,2296	17	2002-2003	57	6	1,3483
7	1973-1974	173	6	0,3392	18	2004-2005	78	6	0,9575
8	1975-1976	76	6	2,8755	19	2006-2007	87	6	0,7199
9	1977-1978	66	4	0,9395	20	2008-2009	44	5	2,3394
10	1979-1980	46	4	1,9299	21	2010-2011	49	5	1,6852
11	1981-1982	67	5	0,8126	22	2012-2013	48	5	0,9499

Janela 2					
Seção	Período	τ	m	D_2	
1	1961-1964	69	5	2,6364	
2	1965-1968	94	5	2,4108	
3	1969-1972	76	5	1,9398	
4	1973-1976	66	5	1,8651	
5	1977-1980	66	6	2,6049	
6	1981-1984	71	6	2,4907	
7	1985-1988	78	6	2,5324	
8	1998-2001	48	6	3,1940	
9	2002-2005	54	5	3,0103	
10	2006-2009	84	5	2,1227	
11	2010-2013	49	6	2,8473	

Fonte: O Autor.

Os resultados aqui apresentados são coerentes, como os encontrados por Viola 2011, que analisando séries de temperatura diárias encontrou valores de tempo de defasagem entre 46 e 80. Para análise de dimensão de imersão m usando FNN os parâmetros encontrados pelo mesmo autor foram de 14 a 39, bem acima dos valores aqui expostos na tabela 1.

Os maiores valores de dimensão de correlação encontrados foram de $D_2=2,8755$ na Janela 1 e $D_2=3,19$ na Janela 2, e os menores em $D_2=0,4735$ na Janela 1 e $D_2=1,8651$ na Janela 2. A dimensão de correlação fornece a medida da dispersão (ou densidade) de pontos do atrator no espaço de estados, é uma medida de quantificação geométrica do atrator (MELLO, 2013).

De acordo com De Paulo et al., 2015, estes valores sugerem que um espaço de fase tridimensional pode ser usado, uma vez que o valor é suficiente para representação deste atrator.

As dimensões de correlação dos atratores associados à dinâmica de evolução dos padrões não lineares da temperatura do ar oscilam por todos os anos entre $D_2=0,4735$ e $D_2=2,8755$. Esta diferença pode ser um indicativo de uma mudança no padrão de complexidade da temperatura do ar, devido a fatores externos ao sistema.

O cálculo da fração de falsos vizinhos para série temporal de temperatura do ar no período de 1961-1989 e 1998-2013. Para este cálculo utilizamos o pacote TISEAN para análise de séries temporais. Os resultados, assim como em De Paulo et al., 2015, sugere uma escolha apropriada de $m=4\sim 8$, em que a dinâmica total dos dados requer uma imersão num espaço dimensional maior que os dados separados.

A tabela 2 é uma síntese dos parâmetros de caracterização da dinâmica complexa, quando se considera as Janelas 1, Janela 2 e a série completa de 1961-2013. Nela esta apresentada também a reconstrução da dinâmica dos dados de ONI, que apresenta um atrator estranho de baixa dimensionalidade, limitado a certo volume do espaço de fase, com uma dimensão de imersão m igual a 4. Mostrando que as flutuações do El Niño são de baixa previsibilidade.

Tabela 2 - Parâmetros da dinâmica não linear das séries completas de dados.

Período	τ	m	D_2
1950-2013(ONI)	27	4	3,0176*
1961-1989	64	4	5,0052*
1998-2013	59	5	3,3568*
1961-2013	71	8	4,5957*

*dimensão não saturada

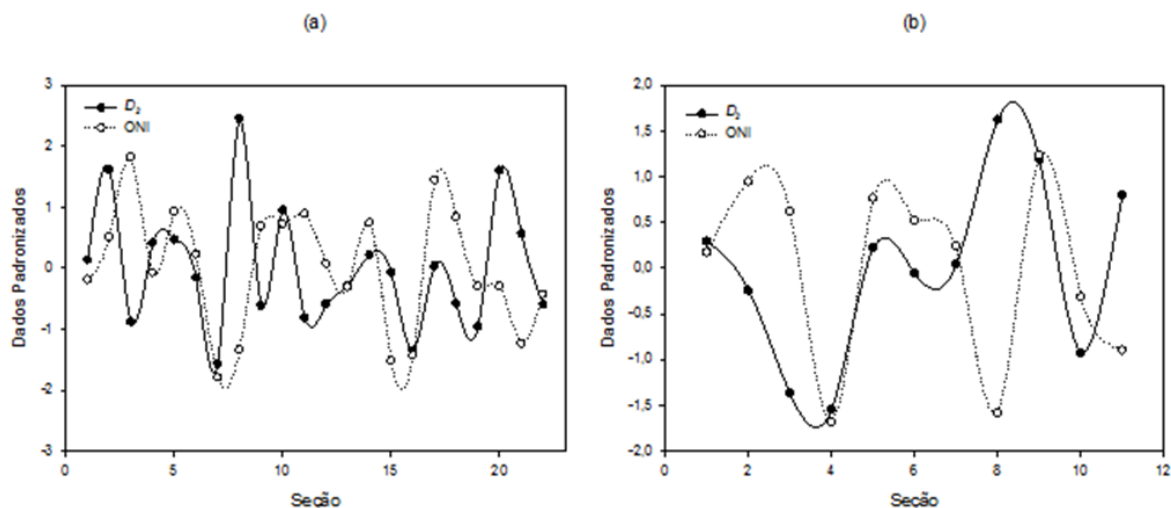
Fonte: O Autor

Se levarmos em conta o fenômeno “Niño” que influencia a variabilidade do sistema climático em escala global, seria possível verificar essa influência de forma local através das variações na evolução temporal de alguma invariante geométrica do sistema? A fim de investigar a influência do ONI sobre essas invariantes do sistemas, estudamos a relação entre o regime oscilatório médio deste índice e os padrões não lineares da temperatura do ar.

A figura 3.a apresenta a relação da evolução temporal entre a dimensão de correlação e o ONI para a Janela 1, e em 3.b para a Janela 2. Em algumas seções da evolução temporal da Janela 1 (figura 2.a) existem valores maiores de dimensão de correlação, o que mostra que o atrator associado a essas séries exibem maior complexidade. Ao passo que isso acontece a

resposta média do ONI a essa variação é inversa em alguns períodos da série. Os indícios de uma possível ação de regulação entre os estados dinâmicos do ONI e da temperatura, também podem ser verificados nessa análise da Janela 2.

Figura 3 - Relação da evolução temporal entre a Dimensão de Correlação e ONI em (a) Janela 1 e em (b) Janela 2.



Para períodos de registros de intensidade moderada e forte do fenômeno El Niño, foram vistos na série entrópica pontos de mínimo e de inflexão, onde a série passou a decrescer 1963 a 1966, 1972-1973, 1982-1983 e 1998. Podemos então observar que a complexidade da variação da temperatura do ar pode ser influenciada pelas oscilações ONI. Silva et al., (2010) já encontraram esse mesmo padrão com dados de temperatura em Piracicaba-SP.

Quando se leva em consideração os anos em que efetivamente ocorreu o El Niño, a relação inversa é evidente principalmente no início da série, o que sugere a influência do El Niño na dinâmica de oscilação dos padrões não lineares. Há uma mudança na complexidade das séries com a ocorrência do El Niño, com isso pode-se dizer que na ocorrência do fenômeno a série se torna menos complexa podendo facilitar sua previsão.

CONCLUSÃO

Cuiabá tem passado nos últimos anos por um processo de transformação intenso em sua estrutura e configuração geográfica, podendo os estudos sobre o clima auxiliar na tomada de decisões e elaboração de políticas públicas, que visem o bem-estar social e a insiram no contexto das mudanças climáticas. Assim, analisamos a temperatura do ar por intermédio de métodos que capturam a dinâmica não linear da série temporal.

Os indícios de uma possível ação de regulação entre os estados dinâmicos do índice ONI e uma influência na dinâmica dos padrões não lineares (dimensão de correlação) da série de temperatura do ar, foram verificados na análise, sugerindo uma influência do El Niño na mudança de complexidade da série.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INMET-BDMEP pelos dados disponibilizados para este trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABARBANEL, H.D.I.; BROWN, R.; SIDROWICH, J.J.; TSIRING, L.S.H.; The Analysis of Observed Chaotic Data in Physical Systems. **Review of Modern Physics**. v.65, n.4, p. 1343-1347, 1993.
- ANTUNES, S.M.L. **Variabilidade climática no atlântico e suas relações com o clima de Portugal**. 2007. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa – 2013- <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>
- BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C. **EL Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul; aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 2003. 110p.
- DE PAULO, S.R.; DE PAULO, I.J.C.; DE DECKER, Y.; Reconstructing the micrometeorological dynamics of the Southern Amazonian transitional forest. **Chaos**. n.25 p.1-8, 2015.
- ECKMANN, J.P.; RUELLE. D. Ergodic Theory of Chaos and Strange Attractors. USA, **Review of Modern Physics**. v.57, n.3, p. 617-656. 1985.
- FELIX, C. A.; **Verificação da Influência do El Niño durante o inverno de 1983 na temperatura do ar sobre o Estado de Minas Gerais utilizando técnicas de geoprocessamento**. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- FRANCO, F.M. **Análise do comportamento termo-higrométrico urbano sob a ótica do uso e ocupação do solo em Cuiabá - MT**. Cuiabá. 2013. 124p. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.
- FRASER, A. M.; SWINNEY, H. L. (1986). Independent coordinates for strange attractors from mutual information, **Physical Review A** . 33(2): 1134–1140.
- GALLAGHER, R.; APPENZELLER, T. Beyond reductionism. **Science** 284:79. 1999.
- GLANTZ, M. H. Introducion. IN: GLANTZ, M. H.; RICHARD, W. K.; NICHOLLS, N. **Telleconnection linking worwide climate anomalies**. New York: Cambridge University. 2001, p.43-72.
- GOMES, F. J. D., **Relação entre Variáveis Meteorológicas e Cobertura do Céu na região central de Cuiabá e entorno**. 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT.
- GRASSBERGER, P.; PROCACCIA I. Characterization of strange attractors. **The American Physical Society**, v.50, p.5, p.346-349, 1983.

GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, Boston. v.13, n.01, p.35-58, 2000.

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

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

MAITELLI, G. T. **Uma Abordagem Tridimensional de Clima Urbano em Área**

Tropical Continental. O Exemplo de Cuiabá – MT. Tese de Doutorado (Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas), Universidade de São Paulo, 1994.

MELLO, G. J. **Previsão micrometeorológica no Pantanal Mato-Grossense pela teoria de sistemas dinâmicos.** Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

MELLO, G. J.; BIUDES, M.S.; GOMES, S.R.S.; MACHADO, N.J.; PEREIRA, O. A.; NOGUEIRA, J.S.; Dimensão fractal de séries de variáveis micrometeorológicas em uma floresta inundável no Pantanal de Mato Grosso. **Ciência e Natura**. v.38 n.1, p. 125 – 136, 2016.

MILLÁN, H.; KALAUZI, A.; LLERENA, G.; SUCOSHAÑAY J.; PIEDRA, D. Meteorological complexity in the Amazonian area of Ecuador: An approach based on

dynamical system theory. **Ecological Complexity**, v.6, p.278-285, 2009.

NICOLIS, G.; PRIGOGINE, I. **Exploring Complexity- An Introduction.** 5ª edição. New York, U.S.A.: W.H. Freeman and Company. 312p. 1989.

OLIVEIRA, A. S. **Análise do desempenho térmico e consumo de energia em residências na cidade de Cuiabá/MT: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

PAULA, G. M. **O Fenômeno El Niño Oscilação Sul e a Erosividade das chuvas em Santa Maria.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) –Universidade Federal Santa Maria, Santa Maria, 2009.

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

RICHMAN J. S.; MOORMAN J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. **American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology**. 278(6): 2039–2049. 2000.

RUELLE, D., TAKENS, F. On the nature of turbulence. **Communications in Mathematical Physics**, v.20, p.167-192, 1971.

SAVI, M. A. **Dinâmica Não Linear e Caos.** Rio de Janeiro: Editora E-papers, 2006. 304 p.

SHUANGCHENG, L.; QIAOFU,Z; SHAOHONG,W.; ERFU, D. Measurement of climate complexity using sample entropy. **International Journal of Climatology**. n.26. p. 2131–2139. 2006.

SILVA, SILVA, J. R. S.; ARAÚJO, L. S.; SACRAMENTO, V. P.; OLIVEIRA, M. R. O.; STOSIC, T.; **Estudo da evolução temporal da complexidade climática em Piracicaba-SP através do SampEn.** XIX Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística (SINAPE), 2010.

SILVA, S.T. **Reconstrução da dinâmica não linear da temperatura do ar em Cuiabá-MT.** Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015.

SIMONI, A. R. **Análise de séries temporais aeroelásticas experimentais não lineares.** 2008. Tese (Doutorado em Aeronaves) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

TAKENS, F. Detecting strange attractors in turbulence, in Dynamical Systems and Turbulence, **Lecture Notes in Mathematics**, eds. Rand, D. & Young, L. S. Springer-Verlag, Berlin, v.898, p.366-381, 1981.

VIDAL, L. A. **Análise de séries meteorológicas de altitude na grande Cuiabá com métodos da teoria da complexidade.** Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

VIOLA, F. M.; PAIVA, S. L. D.; SAVI, M. A. Analysis of the global warming dynamics from temperature time series. **Ecological Modelling**, v.221, p.1964-1978,

2010.

WANG, X.; CHEN, G. Chaotification via arbitrarily small feedback controls: Theory, method and applications, Int. **J. Bifurcation and Chaos**, n. 10, 549-570. 2001.

ZAFFALON, M.; HUTTER, M. Robust features selection by mutual information distributions, **18th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence**, pp. 577–584. 2002.

Recebido em: 11/04/2015

Aprovado para publicação em: 27/07/2015